

Reifbildung und -wachstum auf gekühlten Rohroberflächen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Alexander Schydlo

aus Hindenburg O/S (Zabrze Polen)

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Peter Stephan
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Andrea Luke
Tag der Einreichung:	12. Januar 2010
Tag der mündlichen Prüfung:	17. März 2010

Darmstadt 2010

D 17

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Technische Thermodynamik der Technischen Universität Darmstadt. Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Fachgebiets Technische Thermodynamik Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Stephan für die Führung und Förderung dieser Arbeit. Unsere zahlreichen fachlichen Diskussionen und die fachlichen Ratschläge waren sehr hilfreich bei der Durchführung der Arbeit.

Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Andrea Luke, Leiterin des Instituts für Thermodynamik der Universität Hannover danke ich vielmals für die Übernahme des Korreferats und für die Bearbeitung der Substratoberflächen. Danken möchte ich auch dem Herrn Dr. Martin Ebert aus dem Fachbereich Umweltmineralogie des Instituts für Angewandte Geowissenschaften TU Darmstadt für die Möglichkeit die Substratoberflächen und Tropfengeometrie in dem Rasterelektronenmikroskop (ESEM) zu untersuchen.

Allen Mitarbeitern des Fachgebietes Technische Thermodynamik, die mich mit Rat und Tat unterstützt haben, will ich auf diesem Wege danken. Mein besonderer Dank gilt Herrn Virgil Stoica, der mich in der ersten Phase meiner experimentellen Untersuchungen unterstützt hat und Herren Boris Schilder und Dr. Manfred Klimm für das Korrekturlesen des Manuskripts und die orthografischen Hinweise. Bei den Mitarbeitern der Werkstatt des Fachgebiets will ich mich für die handwerklichen Arbeiten an der Versuchsanlage und die zahlreichen und wertvollen Hinweise bedanken.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Frau Marlene, meinen Eltern, meinem Bruder, die durch sehr viel Verständnis, Unterstützung, Motivation und Geduld zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

Ich versichere an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit, abgesehen von den genannten Hilfsmitteln, selbstständig angefertigt habe.

Darmstadt, im Winter 2009

Alexander Schydlo

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	XII
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	3
2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung	4
2.2 Morphologie des Eises	16
2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur .	18
2.3.1 Zeitliche Entwicklung des Reifprofils auf der Substratober- fläche	19
2.3.2 Mittlere Reifdichte	22
2.3.3 Wärmeleitfähigkeit des Reifes	24
2.3.4 Wärme- und Stoffübertragung	28
2.3.5 Einfluss der Struktur der Substratoberfläche auf Reifbildungs- vorgänge	32
2.4 Modelle der Reifbildung	35
2.4.1 Tropfenkondensationsphase	38
2.4.2 Kristallwachstumsphasen	39
2.4.3 Reifschichtwachstumsphase	39
3 Ziel der Arbeit und Ableitung eines Versuchsprogramms	41
4 Versuchsanlage	45
4.1 Aufbau des Versuchstands	45
4.1.1 Luftkonditionierungseinheit	48
4.1.2 Messstrecke	50
4.1.3 Konstruktion des Versuchskörpers	51
4.2 Messwerterfassung	52
4.2.1 Temperaturmessung	52
4.2.2 Feuchtigkeitsmessung	53

INHALTSVERZEICHNIS

4.2.3	Durchflussmessung	55
4.2.4	Optische Messmethode zur Bestimmung des Reifvolumens	55
4.2.5	Fehleranalyse von direkt gemessenen physikalischen Größen	58
4.3	Indirekt bestimmte physikalische Größen	60
4.3.1	Masse und Massenstrom des Kondensates	60
4.3.2	Gesamter Wärmestrom	61
4.3.3	Volumen des Reifes	62
4.3.4	Mittlere Reifdichte	63
4.3.5	Reifwachstumsgeschwindigkeit	64
4.3.6	Fehleranalyse von indirekt ausgerechneten physikalischen Größen	64
5	Versuchsdurchführung und Ergebnisse	67
5.1	Vorbereitung der Substratoberfläche	67
5.2	Standardparameter	68
5.3	Einfluss der Luftparameter	75
5.3.1	Relative Feuchtigkeit	75
5.3.2	Luftgeschwindigkeit	80
5.3.3	Lufttemperatur	85
5.4	Variierende Substratoberflächenparameter	90
5.4.1	Variierende Substratoberflächentemperatur	91
5.4.2	Variierende Substratoberflächenstruktur	95
5.4.3	Variierende Substratoberflächenrauheit	101
5.5	Geometrie des Kanals	106
5.6	Geometrie des Rohres	111
6	Ableitung von Korrelationsgleichungen und deren Validierung	116
6.1	Methodische Ansätze zur Erstellung der Korrelationsgleichungen	117
6.1.1	Korrelationsgleichung für die Masse des Kondensates	121
6.1.2	Korrelationsgleichung für die mittlere Reifdichte	125
7	Zusammenfassung und Ausblick	129
A	Korrelationsgleichungen für die Wärmeleitfähigkeit des Reifes	132
B	Abbildung des Kanals im Rohrbündel	134
C	Ergebnisse aus Korrelationsgleichungen	136

Literaturverzeichnis	139
----------------------	-----

Tabellenverzeichnis

2.1	Oberflächenspannungen σ_{ij} und die Änderungen der freien volumen- bezogenen Enthalpie ΔG für verschiedene Phasenumwandlungen . .	9
2.2	Strukturmodelle zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Reifes λ_R in Abhängigkeit der Reifstruktur	27
3.1	Versuchsprogramm	43
3.2	Rauhigkeit und Struktur der Substratoberfläche	44
4.1	Technische Parameter von ausgewählten Bestandteilen der Versuchs- anlage	48
4.2	Technische Parameter von ausgewählten Bestandteilen der Luftkon- ditionierungssektion	49
4.3	Messpunkte für die Kalibrierung nach DKD und ihre Abweichungen	54
4.4	Technische Parameter der optischen Messgeräte	58
4.5	Prozentualer Fehler von indirekt gemessenen physikalischen Größen	66
6.1	Koeffizienten A für die Korrelationsgleichung zur Berechnung der Masse des Kondensates	122
6.2	Koeffizienten R_f für die Korrelationsgleichung zur Berechnung der Masse des Kondensates	122
6.3	Exponenten Z_i für die Korrelationsgleichung zur Berechnung der Masse ausfallenden Wassers	122
6.4	Mittlere Standardabweichungen der Korrelationsgleichung für die Masse ausfallenden Wassers	124
6.5	Koeffizienten A für die Korrelationsgleichung der mittleren Reifdichte	125
6.6	Koeffizienten R_f für die Korrelationsgleichung der mittleren Reifdichte	125
6.7	Exponenten Z_i für die Korrelationsgleichung der mittleren Reifdichte	126
6.8	Mittlere Standardabweichungen der Korrelationsgleichung für die mittlere Reifdichte.	128

Abbildungsverzeichnis

2.1	Reifbildungsphasen	6
2.2	Keimbildung auf verschiedenen Substratoberflächen	7
2.3	Verlauf der Benetzungswinkelfuntion für konvexe, ebene und konkave Substratoberflächen	11
2.4	Verlauf der Benetzungswinkelfuntion für stufige Substratoberflächen	11
2.5	Kritischer Übersättigungsgrad für Desublimation und Kondensation	13
2.6	Kritische Substratunterkühlung für Desublimation und Kondensation – ebene, konvexe und konkave Substratoberfläche	14
2.7	Kritische Substratunterkühlung für Desublimation und Kondensation – stufige Substratoberfläche	15
2.8	Eisstrukturen, Wachstumsraten und Wärmeleitfähigkeit des Eises .	17
2.9	Reifdickeverlauf	20
2.10	Zeitliche Entwicklung des Reifschichtprofils	21
2.11	Reifdickeverlauf	22
2.12	Gliederung der Messmethoden der Reifdichte	24
2.13	Gliederung der Messmethoden der Wärmeleitfähigkeit der Reifstruktur	25
2.14	Wärmeleitfähigkeit des Reifes als Funktion der Reifdichte	26
2.15	Wärmeleitfähigkeit des Reifes als Funktion der Reifdichte für verschiedene Strukturmodelle	28
2.16	Momentane Nusseltzahl als Funktion der Zeit an einem querangeströmten Rohr	30
2.17	Superhydrophobe selbstreinigende Lotusoberfläche	32
2.18	Tropfenkondensation auf Substratoberflächen	33
2.19	Reifbildung auf gekühlten Rohroberflächen	34
2.20	Reifbildungsmodell	35
2.21	Tropfenkondensationsprozess	38

3.1	Rohrbündel mit schematischer Darstellung des Kanals	43
4.1	Schema der Versuchsanlage	47
4.2	Luftkonditionierungseinheit	49
4.3	Messstrecke	50
4.4	Eingebauter Versuchskörper im Kanal	51
4.5	Ausgangsbild und überarbeitetes Bild mit verbesserter Schärfe . . .	56
4.6	Histogramm und überarbeitetes Bild mit identifiziertem Reifprofil .	57
4.7	Schwarz–weiß Bilder	57
4.8	Verlauf der Lufttemperatur und der relativen Feuchtigkeit	60
4.9	Latente Erstarrungswärme	62
4.10	Die Reproduzierbarkeit der Reifvolumenzuwachsmessung	63
5.1	Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für Standard- parameter	68
5.2	Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für Standardparameter	70
5.3	Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für Standardparameter .	71
5.4	Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für Standardparameter	72
5.5	Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für Standardparameter .	73
5.6	Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für Standard- parameter	74
5.7	Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende relative Feuchtigkeit	76
5.8	Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende relative Feuchtigkeit	76
5.9	Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende relative Feuchtigkeit	77
5.10	Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende relative Feuch- tigkeit	78
5.11	Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende relative Feuchtigkeit	79
5.12	Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende relative Feuchtigkeit	79
5.13	Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Luftgeschwindigkeit	81
5.14	Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Luft- geschwindigkeit	81

5.15	Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Luftgeschwindigkeit	82
5.16	Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Luftgeschwindigkeit	83
5.17	Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Luftgeschwindigkeit	84
5.18	Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Luftgeschwindigkeit	85
5.19	Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Lufttemperatur	86
5.20	Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Lufttemperatur	86
5.21	Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Lufttemperatur	87
5.22	Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Lufttemperatur	88
5.23	Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Lufttemperatur	89
5.24	Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Lufttemperatur	89
5.25	Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Rohrtemperatur	91
5.26	Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Rohrtemperatur	92
5.27	Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Rohrtemperatur	93
5.28	Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Rohrtemperatur	94
5.29	Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Rohrtemperatur	94
5.30	Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Rohrtemperatur	95
5.31	Geometrie des Wassertropfens auf einer Lotusoberfläche	97
5.32	Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Substratoberflächenstruktur	97
5.33	Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Substratoberflächenstruktur	98
5.34	Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Substratoberflächenstruktur	99

5.35	Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Substratoberflächenstruktur	100
5.36	Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Substratoberflächenstruktur	100
5.37	Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Substratoberflächenstruktur	101
5.38	Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Substratoberflächenrauheit	102
5.39	Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Substratoberflächenrauheit	102
5.40	Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Substratoberflächenrauheit	103
5.41	Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Substratoberflächenrauheit	104
5.42	Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Substratoberflächenrauheit	105
5.43	Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Substratoberflächenrauheit	105
5.44	Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Kanalhöhe	107
5.45	Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Kanalhöhe	107
5.46	Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Kanalhöhe	108
5.47	Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Kanalhöhe . . .	109
5.48	Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Kanalhöhe	110
5.49	Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Kanalhöhe	110
5.50	Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierenden Rohrdurchmesser	112
5.51	Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierenden Rohrdurchmesser	112
5.52	Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierenden Rohrdurchmesser	113
5.53	Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierenden Rohrdurchmesser.	114
5.54	Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierenden Rohrdurchmesser.	114

5.55	Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierenden Rohrdurchmesser.	115
6.1	Ausschnitt der ersten Rohrreihe eines Rohrbündels mit gemessenen Einflussparametern	118
6.2	Masse des Kondensates als Funktion der reduzierten Rd- Zahl und der Zeit τ_r	121
6.3	Masse des Kondensates als Funktion der reduzierten Rd-Zahl und der Zeit τ_r	123
6.4	Standardabweichung der Korrelationsgleichung zur Berechnung der Masse des Kondensates	124
6.5	Mittlere Reifdichte als Funktion der reduzierten Rd-Zahl und der Zeit τ_r	126
6.6	Mittlere Reifdichte als Funktion der reduzierten Rd-Zahl und der Zeit τ_r	127
6.7	Standardabweichung der Korrelationsgleichung zur Berechnung der mittleren Reifdichte	128
B.1	Luftgeschwindigkeitsprofil im Kanal - Standardparameter	134
B.2	Luftgeschwindigkeitsprofil der ersten Rohrreihe des analysierten Rohrbündelmodells (siehe Abb. 3.1)	135
C.1	Masse des ausfallenden Wassers aus Experiment und Korrelation . .	137
C.2	Mittlere Reifdichte aus Experiment und Korrelation	138

Nomenklatur

Lateinische Großbuchstaben

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
A	-	Konstante
A_p	μm	Pixelgröße
B	-	Konstante
C	-	Bezeichnung des Kupferrohres
D	$m^2 \cdot s^{-1}$	Diffusionskoeffizient
E	%	prozentualer Fehler
F	-	Funktion
ΔG	J/m^3	volumenbezogene Änderung der freien Energie
ΔG_F	J	Oberflächenänderungsenergie
ΔG_V	J	Volumenänderungsenergie
I	$(m^2 \cdot s)^{-1}$	Nukleationsrate
L	—	Bezeichnung der Lotusstruktur
M	kg	Masse
\dot{M}	$kg \cdot s^{-1}$	Massenstrom
N	—	Anzahl der Messwerte
N_{Pw}	—	Anzahl der weißen Pixel
\dot{Q}	W	Wärmestrom
rF	%	relative Feuchtigkeit
R	$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	individuelle Gaskonstante
\bar{R}	$J \cdot (kmol \cdot K)^{-1}$	universelle Gaskonstante
R_a	μm	Rauheit
R_f	—	Rauheitsfaktor
S	—	Übersättigungsgrad
T	K	absolute Temperatur
ΔT	K	Temperaturdifferenz
ΔT_S	K	Substratunterkühlung

V	m^3	Volumen
\dot{V}	$m^3 \cdot s^{-1}$	Reifzuwachsgeschwindigkeit
X	-	gemessener Wert
\bar{X}	-	mittlerer gemessener Wert
$\delta\bar{X}$	-	zufälliger Fehler
ΔX	-	systematischer Fehler
Z	-	Exponent

Lateinische Kleinbuchstaben

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
a	—	Querteilungsverhältnis
c_p	$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
d	mm	Durchmesser des Rohres
f	$^\circ / rad$	Beneztungswinkelfunktion
g	—	Funktion
k	$J \cdot K^{-1}$	Boltzmannkonstante
l_r	m	effektiv gekühlte Rohrlänge
l_0	m	Überströmlänge
\dot{m}	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	Massenstromdichte
n	—	Anzahl der variierenden Einflussgrößen
p	$N \cdot m^{-2}$	Druck
\dot{q}	$W \cdot m^{-2}$	Wärmestromdichte
r	m	Radius
r_{lat}	$J \cdot kg^{-1}$	latente Wärme
s	mm	Kanalhöhe
t	$^\circ C$	relative Temperatur
u	$m \cdot s^{-1}$	Geschwindigkeit
x	-	Radiusverhältnis
x_g	$kg_{H_2O} \cdot kg_{tr.L}^{-1}$	Wassergehalt
\bar{v}	$m^3 \cdot kmol^{-1}$	spezifisches Molvolumen

Griechische Kleinbuchstaben

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
α	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Wärmeübergangskoeffizient
β	$^{\circ}$	Winkel
β	$m \cdot s^{-1}$	Stoffübergangskoeffizient
δ	m	Dicke
ϵ	—	Parameter der Studentschen t-Verteilung
ϵ_R	—	Porosität der Reifstruktur
Θ	$^{\circ} / rad$	Benetzungswinkel
λ	$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
ν	$m \cdot s^{-2}$	kinematische Viskosität
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	Dichte
$\bar{\rho}$	$kg \cdot m^{-3}$	mittlere Dichte
σ	$N \cdot m^{-1}$	Oberflächenspannung
$\bar{\sigma}$	—	mittlere Standardabweichung
τ	min	Zeit
φ	%	relative Feuchte

Subskripte

D	Dampf
E	Eis
f	Fluid
fL	feuchte Luft
fühl	fühlbar
g	Gas
G	gesamt
h	heterogen
i,j	freie Indizes/Phasen
k	freie Keim
kb	Kombination

kl	Kugel
kor	Korrelation
ku	Kubisch
K	Kondensat
lat	latent
ph	Phasengrenze
pr	Parallel
P	Poren
r	reduziert
rh	Reihen
s	gesättigt
S	Substrat
R	Reif
tr.L	trockene Luft
w	Wand
W	weiß
zf	Zufall
*	kritisch/reduziert
,	gesättigt

Abkürzungen

AS	Luftauslaufsektion
CCDK	CCD Kamera
D	Düse
DKD	Deutscher Kalibrierdienst
FK	Füllkörperschicht
FS	Feuchtigkeitssensor
HF	Heizfolie
IMP	Wandler
KE	Luftkonditionierungseinheit

KQ	Kaltlichtquelle
MS	Messektion
PC	Personal Computer
RK	Rieselkolonne
RL	Ringlicht
S	Sammler
SE	Strömungsaufbereitungssektion
SR	Struktur/Rauhigkeit
TS	Thermostat
V	Verteiler
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VK	Versuchskörper
WH	Widerstandsheizung
WO	Weitwinkelobjektiv

Dimensionslose Kennzahlen

Gr	Grashof-Zahl
Le	Lewis-Zahl
Nu	Nusselt-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
Rd	reduzierte Zahl
Re	Reynolds-Zahl
Sc	Schmidt-Zahl
Ste	Stefan-Zahl

Kapitel 1

Einleitung

Reifbildung, als physikalisches Phänomen, ist sehr oft in der alltäglichen Umgebung zu beobachten. In der Natur entsteht der Reif in den kalten Wintermonaten auf festen Oberflächen, deren Temperatur unterhalb der Erstarrungstemperatur des aus der feuchten Luft kondensierten Wasserdampfes liegt. Als Beispiele aus dem alltäglichen Leben kann man die Entstehung von Reifschichten auf Autoscheiben, Pflanzen und anderen Oberflächen beobachten. In den meisten Fällen der industriellen Praxis ist die entstehende Reifschicht unerwünscht und hat einen negativen Einfluss auf den Betriebszustand der Anlage durch die Isolierung und Verschlechterung der Wärmeübertragung zwischen der umgebenden Luft und der gekühlten wärmeübertragenden Oberflächen. Insbesondere verringert der Reif die Kälteleistung der Anlage und erhöht die Exergieverluste und die Betriebskosten. Darüber hinaus reduziert die entstehende Reifschicht, z. B. in den Luftkanälen, den Strömungsquerschnitt für die durchströmende feuchte Luft, vergrößert zugleich den Durchflusswiderstand und die Druckverluste.

Morphologische Betrachtungen der Reifstruktur ermöglichen eine genaue Analyse und bessere Erkenntnisse der physikalischen Phänomene während der Reifbildung. In der umgebenden feuchten Luft an Substratoberflächen¹, deren Temperatur unterhalb der Erstarrungstemperatur des Wassers liegt, entsteht die Reifstruktur. Wenn die feuchte Luft den Taupunkt erreicht, welcher abhängig von der Lufttemperatur und Wasserbeladung der Luft ist, kondensiert der Wasserdampf auf der gekühlten Substratoberfläche. In den meisten Fällen ist der Massenstrom des Kondensates so gering, dass dies zur Tropfenkondensation führt. Nachdem die Tropfen ihr maximales Volumen erreicht haben, das abhängig von den Umgebungs- und

¹Die experimentell untersuchte gekühlte Oberfläche auf der die Reifbildung stattfindet

Substratoberflächenparametern ist, erfolgt ihre Erstarrung. Die erstarrten Wassertropfen bilden eine Grundlage für die Kristallwachstumsphasen. Das führt zum allmählichen Anwachsen der Reifstruktur. Die anwachsenden Eiskristalle bilden in der Reifstruktur geschlossene Räume, in denen sich feuchte Luft befindet. Dieses Phänomen ist instationär und bedingt eine zeitliche Entwicklung der Reifdicke während der Experimentdauer.

Das Reifbildungsphänomen als industrielles Problem ist mit der Geschichte der Kältetechnik verbunden. Die schnelle Entwicklung der Kälteindustrie im 19. Jahrhundert wurde durch den Bau der ersten Absorptionskältemaschine (1859) mit Ammoniak - Wasser - Lösung als Kältemittel von dem französischen Ingenieur F. Carre eingeleitet. Im Jahr 1874 baute Professor Karl von Linde seine erste Kältemaschine mit einem mechanischen Verdichter. Ähnlich wie in der Konstruktion von F. Carre wurde als Kältemittel Ammoniak verwendet.

Die ersten Erwähnungen des Reifbildungsphänomens in der deutschen Fachliteratur stammen aus den Dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts. Die Publikationen von Piening [61] und Schropp [70] beinhalten die ersten qualitativen sowie quantitativen theoretischen und experimentellen Untersuchungen mit verallgemeinerten beschreibenden Eigenschaften des Reifes. Viele Autoren stellen in neueren Veröffentlichungen einen Einfluss von thermischen Luft- und Oberflächenparametern, Geometrie des Kanals und der gekühlten Substratoberflächen sowie deren Struktur und Rauigkeit auf die Reifbildungsvorgänge vor. Aus der experimentellen Arbeit ist eine Entwicklung mathematischer Modelle zur Beschreibung der Reifbildungsvorgänge hervorgegangen. Zunehmende Rechenleistungen der Personal-Computer, einschließlich der Anwendung der CFD-Codes, ermöglichen die numerische Analyse und Beschreibung der physikalischen Phänomene in der Reifschicht. Im nächsten Schritt der Untersuchung des Reifbildungsprozesses entstehen die Korrelationsgleichungen für die praktische Anwendung der experimentellen Ergebnisse. Diese Gleichungen ermöglichen die schnelle Berechnung erforderlicher physikalischer Größen. Aus praktischer Sicht ist es nötig und notwendig, die wichtigsten Parameter zu korrelieren.

In den letzten Jahren tragen aufgrund des Anstiegs der Genauigkeit von Messgeräten und der Entwicklung neuer Messmethoden die experimentellen Messungen der Reifschichtparameter zum besseren Verständnis des Reifbildungsphänomens bei.

Kapitel 2

Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über ausgewählte Veröffentlichungen gegeben. Alle physikalischen Phänomene in den Reifbildungsphasen werden detailliert beschrieben.

Reifbildung, als unerwünschtes Phänomen in einem Wärmeübertragungsprozess, welches zwischen der feuchten Luft und wärmeübertragender Substratoberfläche stattfindet, wird seit langem untersucht. Viele Forscher konzentrieren sich in ihren experimentellen Versuchen, in der Vergangenheit sowie auch heutzutage, auf verschiedene Zustandsgrößen, welche die Reifstruktureigenschaften beeinflussen. Die Notwendigkeit der experimentellen Untersuchungen der Reifstruktur ergibt sich aus der Isolationswirkung der porösen Reifschicht in der Kältetechnik. Die ersten Hinweise auf den Einfluss der entstehenden Reifstruktur auf die wärmeübertragenden flachen Elemente der Wärmeübertrager haben experimentelle Studien ergeben. Die Publikationen von Beer und Lürer [50], Fossa und Tanda [24], Cheng und Shiu [12], Lee und Ro [47], Östin [76], O’Neal und Tree [58], Tokura et al. [79], Östin und Andersson [77], Yun et al. [88], Kennedy und Goodman [37] präsentieren die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen auf ebenen horizontalen oder vertikalen gekühlten Platten. Direkte Untersuchungen der Reifbildung an Wärmeüberträgern haben unter anderem Gatchilov und Ivanova [26], Hofmann [30], Lotz [51], Shang et al. [72], Tudor et al. [81], Deng et al. [17] durchgeführt.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen können bei den Berechnungen der flachen Wärmeübertrager, in denen die entstehende isolierende Reifschicht den Nutzeffekt der Wärmeübertragung beeinflusst, hilfreich sein.

Relativ wenige Forscher, unter anderem Schropp [71], Marinyuk [53], Lee und Ro [46], Schneider [68], haben sich mit ähnlichen Reifbildungsphänomenen auf Rohroberflächen beschäftigt. Ihre experimentellen Versuche ermöglichten eine Beobach-

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

tung und mathematische Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der porösen Reifschicht auf anderen Geometrien als auf einer ebenen Platte, welche auch in der Kältetechnik eine bedeutende Rolle spielen.

In den letzten Jahren sind viele interessante experimentelle Untersuchungen auch bezüglich der Entwicklung neuer Oberflächenstrukturen durchgeführt worden. Diese Substratoberflächenstrukturen haben einen signifikanten Einfluss auf die Reifeigenschaften. Zum Beispiel beinhalten Publikationen von Lee et al. [41] und Shin et al. [74] eine Beschreibung der entstehenden Reifstruktur auf Substratoberflächen mit verschiedenen Benetzungseigenschaften.

In den oben erwähnten Untersuchungen wurden verschiedene Einflussgrößen variiert. In den meisten Fällen sind die untersuchten gekühlten Substratoberflächen in Luftkanäle eingebaut, in denen man die Luftparameter relative Feuchtigkeit, Temperatur und Luftgeschwindigkeit variieren kann. Darüber hinaus ist die Substratoberflächentemperatur ein bedeutender, die Reifstruktur beeinflussender Parameter, der auch in einem bestimmten Temperaturbereich variierbar ist.

Die direkt gemessenen Parameter ermöglichen die Berechnung der Masse und des Massenstroms des kondensierten Wasserdampfes sowie des zur Substratoberfläche übertragenen Wärmestroms. Unter Verwendung einer Messmethode zur Bestimmung des Reifvolumens lässt sich die mittlere Reifdichte ermitteln. Diese zentrale Größe beeinflusst die Wärmeübertragungseigenschaften, also die Isolationswirkung der Reifstruktur. In vielen Publikationen ist die Wärmeleitfähigkeit des Reifes als Funktion der mittleren Reifdichte ausgedrückt.

Gleichzeitig mit den experimentellen Versuchen entstanden die ersten mathematischen Modelle zur Beschreibung der Wärme- und Stoffübertragung in poröser instationärer Reifstruktur und Korrelationsgleichungen für die wichtigsten Parameter des Reifes.

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

Wie schon im Kapitel 1 angedeutet wurde, erfolgt Reifbildung, wenn in feuchter Luft enthaltener Wasserdampf auf einer unter den Gefrierpunkt des Wassers gekühlten Substratoberfläche kondensiert und Keime für den Tropfenzuwachs bildet. Die ausgebildeten Tropfen erstarren nach Erreichen ihres kritischen Radius und initiieren die Entwicklung der porösen Reifstruktur, welche eine thermische Isolationswirkung bedingt. Die genaue Einteilung und Beschreibung der einzelnen

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

Phasenumwandlungen und Prozesse in der Reifbildungsphase ermöglichen ein besseres Verständnis des Phänomens.

Der Reifbildungsprozess kann in zwei primäre Phasen eingeteilt werden. Die erste Phase wird **Keimbildungsphase** genannt. Die physikalischen Phänomene in dieser ersten Phase bestehen aus *Kondensation* des Wasserdampfs, *Tropfenwachstum* und *Tropfenerstarrung*.

In der zweiten Phase, allgemein als **Kristallwachstumsphase** definiert, findet folgendes statt: *Eindimensionales Kristallwachstum*, bei dem auf den erstarrten Tropfen Eissäulen entstehen, und *Reifschichtwachstum* mit anfänglicher und vollständig ausgebildeter dreidimensionaler Struktur.

Nach Aoki et al. [4] ist das letzte Phänomen von der Massenstromdichte des kondensierten Dampfes abhängig.

Für die Massenstromdichten des ausfallenden Wassers von $\dot{m}_D \geq 0.6 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ kann man in der porösen Reifschicht eine Verdickung mit gleichzeitiger Verdichtung der Struktur beobachten. Dieser Prozess lässt sich mit Hilfe der Analyse der physikalischen Phänomene erklären: Die auf der Reifschicht kondensierenden Wassertröpfchen erreichen in ihrer Wachstumsphase maximal eine bestimmte Größe und verbinden sich danach zu einem Wasserfilm. Die Temperatur des Wasserfilms ist höher als die der oberen Reifschicht an der Fest-Flüssig-Phasengrenze. Das führt zur allmählichen Abschmelzung der äußeren Reifschicht und ermöglicht durch die Wirkung der Kapillarkräfte das Eindringen des flüssigen, unterkühlten Wassers in die freien Regionen der porösen Reifstruktur und seine Erstarrung. Mit diesem Phänomen lässt sich bei konstantem Reifvolumen der Verdichtungsprozess anhand der Erhöhung der Eismasse identifizieren. Natürlich erfolgen in den realen Prozessen der Reifbildung für Massenströme dieser Größenordnung beide Erscheinungen, die Verdichtung und die Verdickung, gleichzeitig. Ein vollständiger Zyklus umfasst die Verdichtung der Reifschicht, abhängig von den Luft- und Substratoberflächenparametern und die Verdickung, also der Aufbau einer neuen Reifschicht auf der vorhandenen, früher verdichteten porösen Struktur. In der Literatur wird dieser Prozess „*melt-back*“ Effekt benannt.

Diese periodischen Schwankungen der Oberflächentemperatur des Reifes, bestätigt experimentell durch Kenedy und Goodman [37], führen in mehrstündigen experimentellen Untersuchungen zum Ausgleich des thermodynamischen Potentials zwischen der feuchten Luft und der äußeren Reifschicht. Im Endeffekt kann nach der Erreichung eines stationären Zustands und maximaler Verdichtung der porösen Struktur das ausfallende flüssige Wasser wegen der kompakten Reifstruktur nicht mehr in den Reif eindringen und ihn weiter verdichten.

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

Für kleinere Massenstromdichten von $\dot{m}_D < 0.6 \text{ kg m}^{-2}\text{h}^{-1}$ bilden die auf der Reifoberfläche ausgebildeten Wassertropfen keinen Wasserfilm und sickern nicht in die poröse Struktur, sondern erstarren an der Oberfläche und bilden neue Keime für den weiteren Kristallzuwachs.

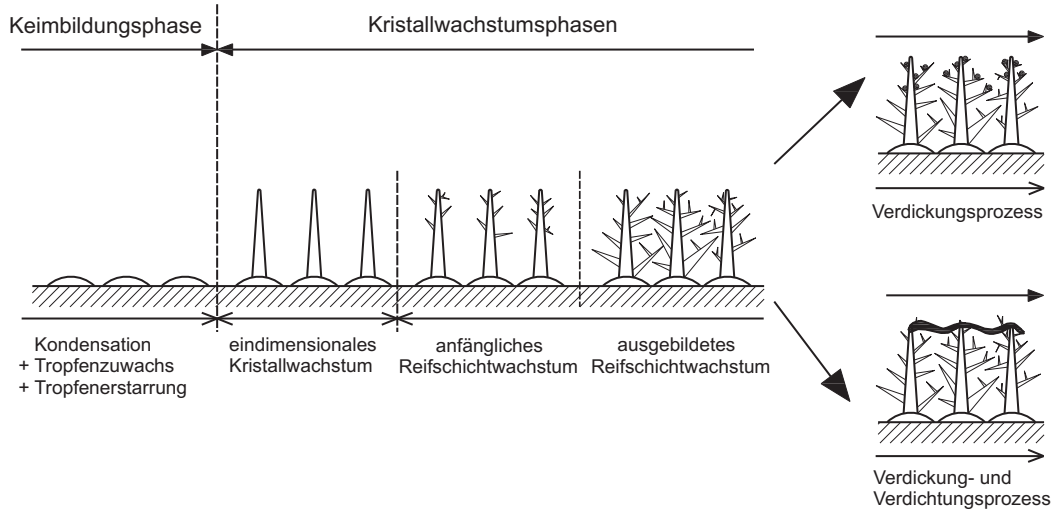


Abbildung 2.1: Reifbildungsphasen nach Hayashi [28], [29]

Folglich lässt sich in diesem Fall keine periodische Verdichtung der Reifschicht feststellen. Die Reifdichtezunahme findet nur durch den Verdickungsprozess statt. Die Phasen der Reifbildung sind in der Abbildung 2.1 dargestellt.

Im Allgemeinen erfordert ein Phasenumwandlungsprozess eine treibende Kraft. Die Temperaturdifferenz zwischen der feuchten Luft und der Substratoberfläche ist proportional zu dem übertragenden Wärmestrom und bildet die Triebkraft für die Phasenumwandlung. Die auf der Substratoberfläche kondensierenden Mikrotropfen initiieren Keimstellen für den Kondensationsprozess. Die Rauigkeit und die Struktur der Substratoberfläche beeinflusst durch die mikroskopischen Unregelmäßigkeiten die Tropfenverteilung, insbesondere die Tropfendichte, welche als Tropfenanzahl pro Flächeneinheit definiert ist. Die Wahrscheinlichkeit der Kondensation und somit die Tropfendichte steigt mit der Zunahme der Rauigkeit und der Unregelmäßigkeit der Substratoberfläche.

Die **Substratunterkühlung** ΔT_S , definiert als die Temperaturdifferenz zwischen der Substratoberflächentemperatur und der Gleichgewichtstemperatur des Erstarrungsvorgangs, entscheidet über die Reihenfolge der Phasenumwandlungen in der Keimbildungsphase. Für geringe Substratunterkühlung geht der Erstarrung die Kondensation des Dampfes auf der Substratoberfläche voraus. Nach dem Erreichen

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

des kritischen Radius erstarren die Wassertropfen. In diesem Fall spricht man von einer heterogenen Kristallisation. Dieses Erstarrungsverhalten von Wassertropfen wurde von Langeheinecke [40] experimentell untersucht und ausführlich erläutert. Direkte Desublimation (Lüer [49], Langeheinecke [40]) ist erst bei Substratunterkühlungen von etwa $\Delta T_S \geq 40 \text{ K}$ möglich. Nach Kamath [36] führt eine Substratunterkühlung von $\Delta T_S \geq 80 \text{ K}$ zur Nebelbildung in der umgebenden feuchten Luft.

Der Keimbildungsprozess ist, neben den Luftparametern, auch von der Geometrie der Substratoberfläche abhängig. Verschiedene Geometrien von Substratoberflächen sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

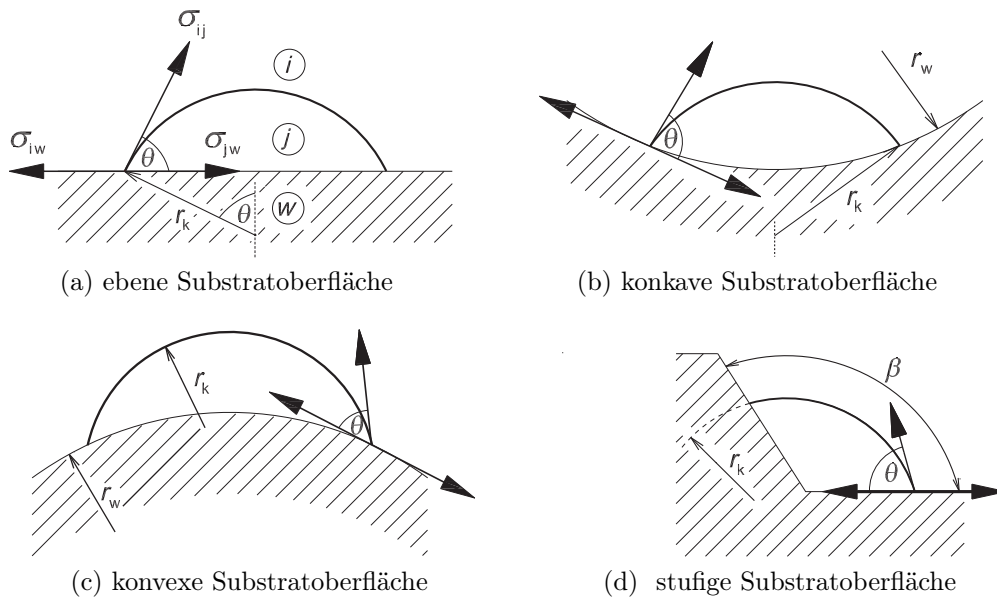


Abbildung 2.2: Keimbildung auf verschiedenen Substratoberflächen

Die zur Phasenumwandlung notwendige Änderung der freien Enthalpie (*Gibbsches Potenzial*) im Keimbildungsprozess hängt von der Oberflächenspannung der Ausgangsphase i , der neuen ausgebildeten Phase j und dem Zuwachs der freien Enthalpie der neuen Phase j ab. Darüber hinaus beeinflusst die Geometrie der Substratoberfläche den kritischen Wert der freien Enthalpie. Diese kann über eine **Benetzungswinkelfunktion**² f ausgedrückt werden [25].

²geometrischer Faktor abhängig von dem Benetzungswinkel des Tropfens Θ , dem Radius des Tropfens r_k^* , dem Radius der Substratoberfläche r_w und dem Stufenwinkel β

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

Allgemein ist die Stabilität eines Keimes auf einer Substratoberfläche mittels des mechanischen Gleichgewichts (Gl. (2.1)) bestimmt,

$$\sigma_{iw} = \sigma_{jw} + \sigma_{ij} \cos \Theta. \quad (2.1)$$

Die Oberflächenänderungsenergie

$$\Delta G_F = 4\pi r_k^2 \sigma_{i,j} f \quad (2.2)$$

reduziert um die Volumenänderungsenergie

$$\Delta G_V = \frac{4}{3}\pi r_k^3 \Delta G f \quad (2.3)$$

welche mit der Initiierung eines Keimes verbunden ist, ermöglicht unter Berücksichtigung des kritischen Radius des Keimes

$$r_k^* = \frac{2\sigma_{ij}}{\Delta G} \quad (2.4)$$

die Berechnung des kritischen Wertes der freien Enthalpie des Keimbildungsprozesses [21], [25]

$$\Delta G_{(h)ij}^* = \frac{16\pi\sigma_{ij}^3}{3\Delta G^2} f. \quad (2.5)$$

Die Werte der Änderung der freien Enthalpie und der Oberflächenspannung in Abhängigkeit von der Temperatur sind nach Sanders in Tabelle 2.1 aufgeführt [66].

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

Tabelle 2.1: Oberflächenspannungen σ_{ij} und die Änderungen der freien volumenbezogenen Enthalpie ΔG für verschiedene Phasenumwandlungen

Phasenwechsel	Oberflächenspannung $\sigma_{ij} \quad [kJ \, m^{-2}]$	freie volumenbezogene Enthalpie $\Delta G \quad [kJ \, m^{-3}]$
<i>Kondensation</i>	$\sigma_{ij} = (75.7 - 0.1775t) \cdot 10^{-6}$	$\Delta G = -\frac{RT}{\bar{v}_j} \ln(S_{(h)j} + 1)$
<i>Erstarrung</i>	$\sigma_{ij} = (23.8 - 0.1025t) \cdot 10^{-6}$	$\Delta G = -\frac{1}{\bar{v}_j} \frac{r_{lat(j)}}{273.15} \Delta T_S$
<i>Desublimation</i>	$\sigma_{ij} = (99.5 - 0.075t) \cdot 10^{-6}$	$\Delta G = -\frac{RT}{\bar{v}_j} \ln(S_{(h)j} + 1)$

Der Verlauf der Benetzungswinkelfunktion f für die einfachste Geometrie, eine ebene Substratoberfläche, ergibt sich nach Fletcher [22] zu

$$f = \frac{1}{4}(2 - 3 \cos \Theta + \cos^3 \Theta) \quad (2.6)$$

für

$$0^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ.$$

Für konvexe Oberflächen (Fletcher [21]) ergibt sich die Benetzungswinkelfunktion zu

$$f = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{1 - x \cos \Theta}{g_1} \right)^3 + 3x^2 \cos \Theta \left(\frac{x - \cos \Theta}{g_1} - 1 \right) + x^3 \left[2 - 3 \left(\frac{x - \cos \Theta}{g_1} \right) + \left(\frac{x - \cos \Theta}{g_1} \right)^3 \right] \right\} \quad (2.7)$$

mit

$$g_1 = \sqrt{1 - 2x \cos \Theta + x^2}$$

und

$$x = \frac{r_w}{r_k^*} \quad (2.8)$$

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

für

$$0^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ.$$

Für konkave Oberflächen gilt nach Fras [25]

$$f = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \left(\frac{1 + x \cos \Theta}{g_2} \right)^3 + 3x^2 \cos \Theta \left(\frac{\cos \Theta}{g_2} - 1 \right) + x^3 \left[3 \left(\frac{2 \cos \Theta + x}{g_2} \right) - \left(\frac{\cos \Theta + x}{g_2} \right)^3 - 2 \right] \right\} \quad (2.9)$$

mit

$$g_2 = \sqrt{1 + 2x \cos \Theta + x^2}$$

für

$$0^\circ \leq \Theta \leq 180^\circ.$$

Für stufige Substratoberflächen gilt nach Fletcher und Sholl [23]

$$f = \frac{1}{4\pi} \left\{ \cos(\Theta) \sin^2(\Theta) \sin \psi - \cos(\Theta) [3 - \cos^2(\Theta)] \psi + 4 \arcsin \left[\sin \left(\frac{\psi}{2} \right) \sin \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \right\} \quad (2.10)$$

mit

$$\cos \left(\frac{\psi}{2} \right) = \cot(\Theta) \cot \left(\frac{\beta}{2} \right)$$

für

$$0 \leq \beta \leq \pi \quad \text{und} \quad \frac{\pi - \beta}{2} \leq \Theta \leq \frac{\pi - \beta}{2}.$$

Die entsprechende Benetzungswinkelfunktion ermöglicht eine Einflussanalyse der obengenannten Funktionen auf den kritischen Wert der freien Enthalpie (Gl. (2.5)) in der Keimbildungsphase und ihre graphische Darstellung (Abbildungen 2.3 und 2.4).

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

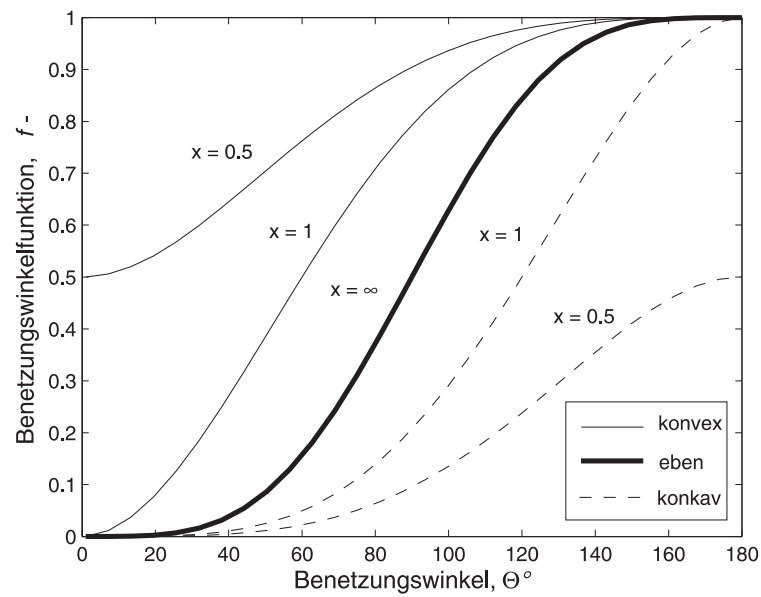


Abbildung 2.3: Verlauf der Benetzungswinkelfunktion für konvexe, ebene und konkave Substratoberflächen

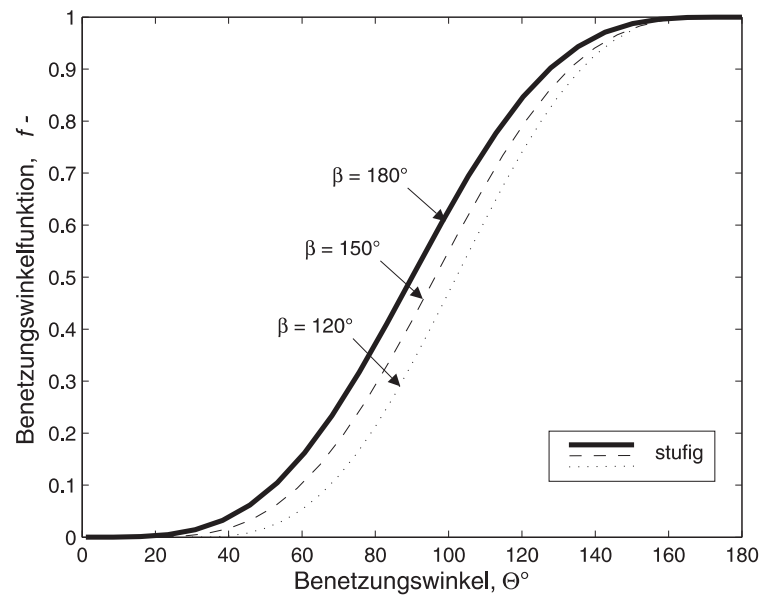


Abbildung 2.4: Verlauf der Benetzungswinkelfunktion für stufige Substratoberflächen

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

Die Verläufe der Funktionen (Gln. (2.6), (2.7) und (2.9)) sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Für einen gegebenen Benetzungswinkel Θ nehmen die Werte der Benetzungswinkelfunktion f ab, wenn:

- der Radius r_w der konvexen Substratoberfläche steigt,
- der Radius r_w der konkaven Substratoberfläche abnimmt.

In Abbildung 2.4 ist die Benetzungswinkelfunktion einer stufigen Substratoberfläche in Abhängigkeit vom Stufenwinkel β aufgetragen.

Eine ähnliche Formulierung der treibenden Kraft des Phasenumwandlungsprozesses wurde, unter Berücksichtigung der Partialdrücke für die thermischen Parameter der feuchten Luft, von Na und Webb [55] vorgeschlagen und von Sanders [66] und Barber [27] berücksichtigt. Die Autoren führen den relativen Übersättigungsgrad S ein, definiert als

$$S_{(h)} = \frac{p_{Df} - p'_D(t_w)}{p'_D(t_w)}. \quad (2.11)$$

Die Differenz $p_{Df} - p'_D(t_w)$ des lokalen Partialdruckes des Wasserdampfs in der feuchten Luft und des Sättigungsdampfdruckes bei Substratoberflächetemperatur t_w drückt die Triebkraft des Phasenumwandlungsprozesses aus. Für die zwei möglichen Mechanismen des Phasenwechsels, nämlich Kondensation und Desublimation, berücksichtigt die Gleichung (2.11) den Partialdruck des Wasserdampfs in einem Sättigungszustand entsprechend mit unterkühlter Flüssigkeit und festem Eis.

Die kritische Geschwindigkeit der heterogenen Nukleation I^* , oft **Nukleationsrate**³ genannt, ist von den thermischen Parametern der Luft sowie der Geometrie und der Temperatur der Substratoberfläche abhängig

$$I^* = I_0 \cdot \exp\left(\frac{-\Delta G_{(h)ij}^*}{k \cdot T_w}\right). \quad (2.12)$$

³siehe Langeheinecke [40], Na und Webb [55], Becker und Dörning [8]

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

Mit Hilfe der Koeffizienten der heterogenen Keimbildung für Kondensation und Desublimation ($I_0 = 10^{29} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) und Erstarrung ($I_0 = 10^{32} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sowie der Boltzmannkonstante ($k = 1.380658 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$) und des kritischen Werts der Nukleationsrate ($I^* = 10^4 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$) für einen kritischen Radius des Keimes r_k^* kann der kritische relative Übersättigungsgrad $S_{(h)}^*$ errechnet werden.

Die zwei Verläufe des Übersättigungsgrads für die Kondensation und die Desublimation sind für ebene, konvexe und konkave Substratoberflächen in Abbildung 2.5 dargestellt.

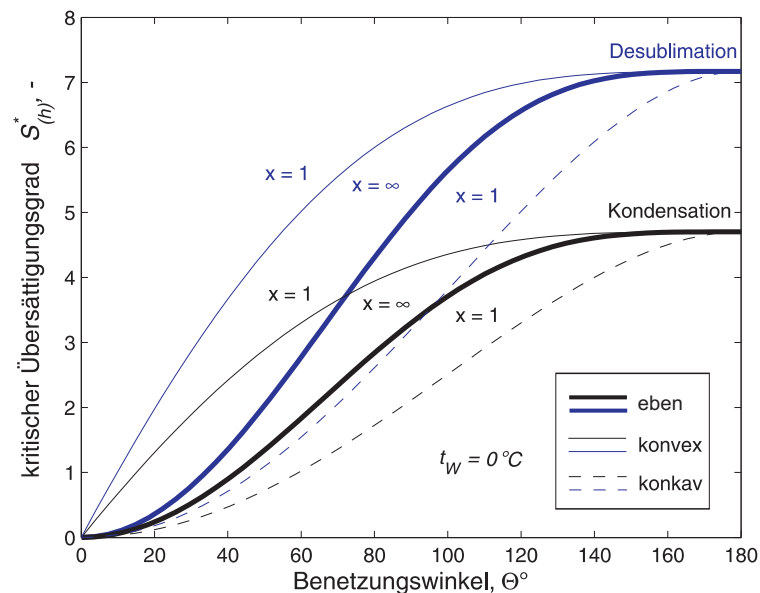


Abbildung 2.5: Kritischer Übersättigungsgrad für Desublimation und Kondensation

Aus diesem Diagramm kann man den kritischen Übersättigungsgrad $S_{(h)}^*$ als Funktion des Benetzungswinkels Θ und des Radiusverhältnisses x ablesen. Die Werte des kritischen Übersättigungsgrades steigen mit zunehmendem Benetzungswinkel. Der Einfluss des Radiusverhältnisses x auf den Übersättigungsgrad ist qualitativ mit dem Zusammenhang der Benetzungswinkelfunktion f und der kritischen Energie des Phasenwechsels $\Delta G_{(h)ij}^*$ vergleichbar (siehe Abbildung 2.3). Für ein zunehmendes Radiusverhältnis x steigen die kritische Energie sowie auch der kritische Übersättigungsgrad für konkave Oberflächen und sinken für konvexe Oberflächen.

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

Darüber hinaus lässt sich beobachten, dass die direkte Desublimation einen größeren kritischen Übersättigungsgrad erfordert, der proportional zum Wert der Substratunterkühlung ΔT_S ist, als die Kondensation.

Die treibende Kraft des Phasenumwandlungsprozesses lässt sich auch mit der Temperaturdifferenz ausdrücken. Die allgemein definierte Substratunterkühlung ΔT_S für die zwei möglichen Phasenumwandlungsprozesse, die Kondensation und die Desublimation, ist gegeben durch

$$\Delta T_{S,j} = t_w - t'_{Dj}, \quad (2.13)$$

wobei der Index j die neu ausgebildete Phase bezeichnet (flüssiges Wasser oder Eis). Für gegebene Übersättigungsgrade $S_{(h)}$ für die Kondensation und Desublimation lassen sich die kritischen Substratunterkühlungen bei festgelegter Taupunkttemperatur und Desublimationstemperatur der feuchten Luft berechnen. Kritische Werte der Substratunterkühlung ΔT_S^* für die Kondensation und die Desublimation abhängig von der Benetzungswinkelfunktion f und von dem Radiusverhältnis x sind in Abbildung 2.6 dargestellt.

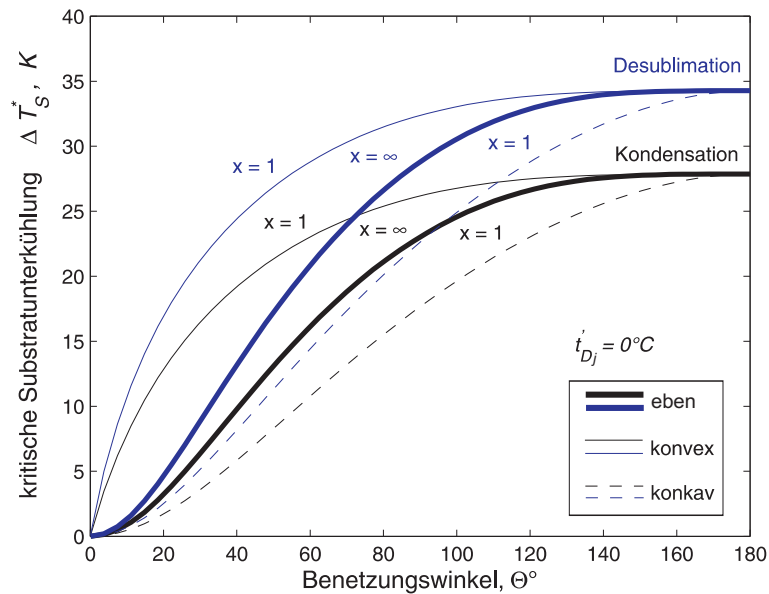


Abbildung 2.6: Kritische Substratunterkühlung für Desublimation und Kondensation – ebene, konvexe und konkave Substratoberfläche

2.1 Phänomenologie und Morphologie der Reifbildung

Aus den obengenannten Zusammenhängen ergibt sich, dass die kritische freie Enthalpie für eine heterogene Nukleation $\Delta G_{(h)ij}^*$ von der Benetzungswinkelfunktion f und der Substratunterkühlung ΔT_S abhängig ist und für die konkave Substratoberfläche den niedrigsten Wert erreicht. Der Einfluss der Rauigkeit der Substratoberflächenstruktur ist als ein geometrischer Faktor des Benetzungswinkels in der Benetzungswinkelfunktion berücksichtigt. Diese Funktion umfasst die Unregelmäßigkeiten der Substratoberfläche und ist für vier verschiedene Geometrien definiert (siehe Abb. 2.2, 2.3 und 2.4).

Mit der Zunahme der Rauigkeit steigt die wärmeübertragende Substratoberfläche und es bilden sich mehr Keimstellen in dem Keimbildungsprozess, die im Endeffekt die Wahrscheinlichkeit einer Phasenumwandlung (Kondensation oder Desublimation) erhöhen.

Die kritische Substratunterkühlung ist in Abbildung 2.7 für stufige Substratoberflächen als ein thermischer Parameter dargestellt, der von dem kritischen Wert der erforderlichen Phasenumwandlungsenergie (allgemein als kritische freie Enthalpie definiert) bestimmt ist.

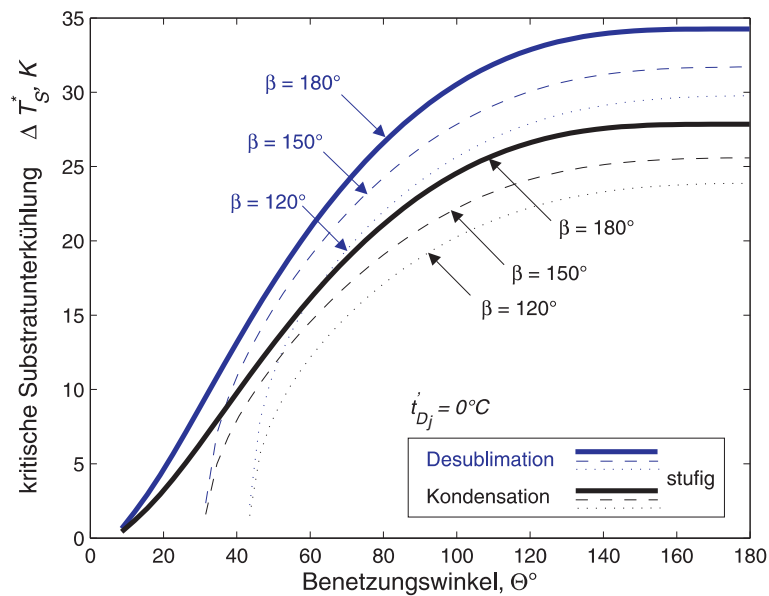


Abbildung 2.7: Kritische Substratunterkühlung für Desublimation und Kondensation – stufige Substratoberfläche

Der Stufenwinkel der Rauigkeit beeinflusst die Substratunterkühlung. Die in Abbildung 2.7 präsentierten Verläufe der kritischen Werte der Substratunterkühlung ΔT_S^* sind für die Sättigungstemperatur $t'_{Dj} = 0\text{ }^\circ\text{C}$ des Dampfs an der Phasengrenze j hergeleitet. In diesem Fall ist diese Temperatur gleich der Temperatur der neuen ausgebildeten Phase j . Man kann beobachten, dass für zunehmenden Stufenwinkel β die Substratunterkühlung für die Kondensation und die Desublimation steigt und im Grenzfall von $\beta = 180^\circ$ die gleichen Werte wie für die ebene Substratoberfläche erreicht. Für kleine Stufenwinkel, wenn die Oberfläche eine größere Rauigkeit aufweist, ist eine geringere Substratunterkühlung nötig, um den gleichen Phasenumwandlungseffekt zu erreichen. Die kritische Substratunterkühlung für die direkte Desublimation ist deutlich höher als die für den Kondensationsprozess. Ähnlich der obengenannten Betrachtung führt Adamson [3] einen Rauigkeitskoeffizienten als ein Verhältnis einer rauhen zu einer glatten Substratoberfläche ein.

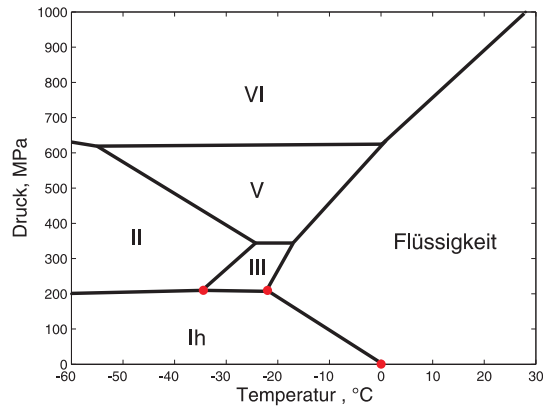
2.2 Morphologie des Eises

Die Morphologie des Eises, als ein Bestandteil der porösen Reifschicht, ist von den Umgebungsparametern abhängig. Die in den kalten Monaten bei Umgebungsdruck ($p_U \approx 1\text{ bar}$) entstehende Eis- oder Schneestruktur gehört zur hexagonalen Eisgruppe (Ih). Der Tripelpunkt des Ih-Eises der Phasengrenze Gas - Flüssigkeit - Festkörper beträgt: $t = 0.01\text{ }^\circ\text{C}, p = 612\text{ Pa}$. Darüber hinaus hat die hexagonale Struktur noch zwei zusätzliche Tripelpunkte, Eis (Ih) - Eis (II) - Eis (III) mit gegebenen Werten der Temperatur und des Drucks; $t = -34.7\text{ }^\circ\text{C}, p = 212.9\text{ MPa}$ [2] und Eis (Ih) - Eis (III) - Flüssigkeit entsprechend mit $t = -21.99\text{ }^\circ\text{C}, p = 209.9\text{ MPa}$ [15]. Diese Punkte sind in Abbildung 2.8(a) dargestellt.

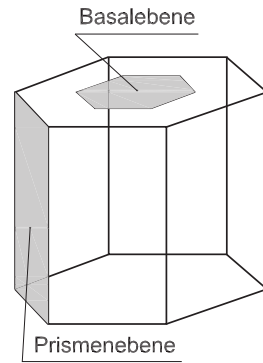
Das spezifische Volumen des Wassers ist nicht linear von der Temperatur abhängig. Im Bereich von $0\text{ }^\circ\text{C}$ bis $\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$ lässt sich die sogenannte Wasseranomalie beobachten, d.h. mit steigender Temperatur nimmt das spezifische Volumen des Wassers ab. Im Bereich zwischen $\sim 4\text{ }^\circ\text{C}$ und $100\text{ }^\circ\text{C}$ nimmt das spezifische Wasservolumen mit steigender Temperatur zu.

Diese anomale Erscheinung lässt sich, im ersten Temperaturbereich, mit den freien Eisstrukturen im flüssigen Wasser erklären. Die Zunahme der Wassertemperatur vernichtet die vorhandene restliche Eisstruktur und ermöglicht zugleich eine dichtere Verteilung der Wasserteilchen, wodurch im Endeffekt das Volumen des Wassers abnimmt.

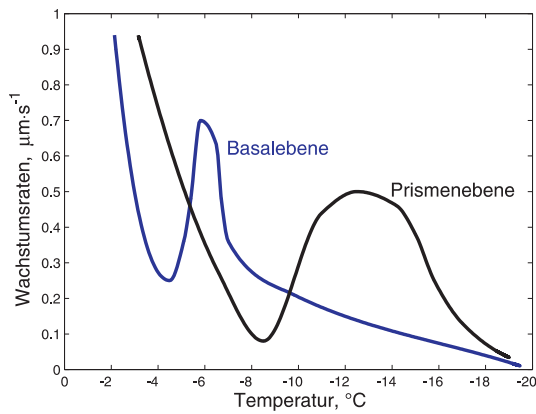
2.2 Morphologie des Eises



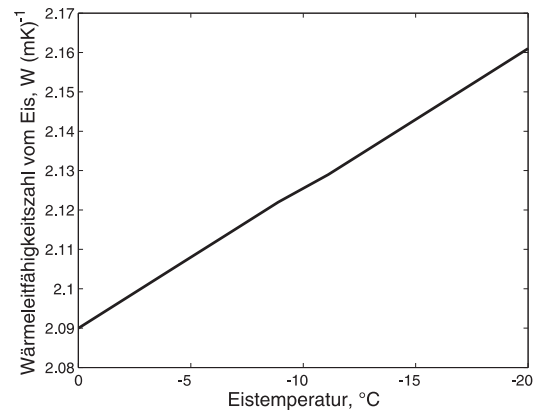
(a) Eisstrukturen und Tripelpunkte



(b) Eiskristall Ih



(c) Wachstumsraten für Basal- und Prismenebene



(d) Wärmeleitfähigkeitszahl von Eis

Abbildung 2.8: Eisstrukturen, Wachstumsraten und Wärmeleitfähigkeit des Eises

Die Wachstumsraten der Basal- und Prismenflächen des Kristalls hängen von der Temperatur ab und haben verschiedene Verläufe. Mit zunehmender Substratunterkühlung in der ersten Phase entstehen die sechseckigen Basalebenen. Danach bilden sich auf den ausgebildeten sechseckigen Grundlagen die Nebenwände des hexagonalen Kristalls. Die qualitativen Verläufe der Wachstumsraten werden nach Lamb und Scott [39] in der Abbildung 2.8(c) gezeigt.

Die Wärmeleitfähigkeit des Eises ist in Abbildung 2.8(d) dargestellt [14].

Bei konstantem Druck steigt die Wärmeleitfähigkeit des Eises mit abnehmender Temperatur.

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

Die morphologische Betrachtung der Reifstruktur, welche eine Analyse von Einflussfaktoren ermöglicht, wird in diesem Unterkapitel ausführlich besprochen. Der Einfluss der Mikrostruktur der Substratoberfläche und der Substratunterkühlung beeinflusst die Tropfendichte, den kritischen Wert der freien Enthalpie bei der Phasenumwandlung und den kritischen Übersättigungsgrad.

Die makroskopischen Einflussfaktoren auf den instationären Prozess der Reifbildung lassen sich in drei Gruppen unterteilen. In der ersten Gruppe befinden sich die Parameter der feuchten Luft, d.h.

- Lufttemperatur,
- relative Luftfeuchtigkeit und
- Luftgeschwindigkeit,

in der zweiten Gruppe die Substratoberflächenparameter

- Substratoberflächentemperatur,
- Struktur⁴, und
- Rauhigkeit

und in der dritten Gruppe die Geometrien,

- Geometrie des Versuchskörpers,
- Geometrie des Kanals,

sowie die

- Zeit.

Die Änderung der obengenannten Parameter beeinflusst die Eigenschaften der Reifstruktur. Mit zunehmendem Wassergehalt der feuchten Luft steigt die Wahrscheinlichkeit der Kondensation. Somit vergrößert sich der Massenstrom des aus

⁴Mit der Entwicklung der Nanotechnologie entstanden neue Oberflächenstrukturen, die man mit Benetzungseigenschaften beschreiben kann. Zu diesen Oberflächen gehört auch z. B. die hydrophobe, selbstreinigende Lotus[®]-Oberfläche.

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

der feuchten Luft kondensierten Dampfs. Das gleiche Verhalten kann man für steigende relative Feuchtigkeit und Luftgeschwindigkeit beobachten. Überdies wirkt sich die Luftgeschwindigkeit durch den dynamischen Druck auf das entstehende Reifprofil und die Reifdicke aus. Hauptsächlich ist dieser Einfluss bei der Umströmung eines im Kanal eingebauten Rohres zu beobachten, wobei der Ablösepunkt der Grenzschicht abhängig von der Reynoldszahl ist. In diesem Fall kann man den im Kanal eingebauten Versuchskörper unter bestimmten Annahmen, die im Kapitel 3 besprochen werden, als einen Ausschnitt eines Rohres aus einem Rohrbündel betrachten⁵.

Eine hohe Substratunterkühlung, vergrößert die treibende Kraft der Reifbildung und ermöglicht zugleich schnellere Tropfenkondensation und -erstarrung in der ersten Phase der Reifbildung, welche auch mit der Erhöhung des Massenstroms des ausfallenden Wassers verbunden ist.

Eine größere Rauigkeit der Substratoberfläche erhöht die Anzahl der Keimbildungsstellen in der Kondensationsphase und verringert den kritischen Wert der freien Enthalpie für die Phasenumwandlung.

Die Dauer des Experiments beeinflusst die zeitliche und lokale Entwicklung der porösen Reifstruktur.

Alle obengenannten Einflussfaktoren wirken auf die Wärme- und Stoffübertragung zwischen der wärmeübertragenden Substratoberfläche, der entstehenden Reifstruktur und der feuchten Luft.

Experimentelle Versuche unter unterschiedlichen Parametern ermöglichen ein besseres Verständnis der physikalischen Phänomene der Reifbildung und eine qualitative sowie quantitative Darstellung der Ergebnisse.

2.3.1 Zeitliche Entwicklung des Reifprofils auf der Substratoberfläche

Die experimentellen Versuche zeigen, dass es möglich ist, die Reifdicke bzw. das Reifvolumen als Funktion der Zeit mit einem parabolischen Verlauf zu beschreiben (Abbildung 2.9).

Der Verlauf der Reifdickefunktion lässt sich durch die Analyse der unterschiedlichen Phasen der Reifbildung erklären. In der ersten Phase (siehe Abbildung 2.1) erreicht die treibende Kraft des Wärmeübertragungsprozesses, die als die Temperaturdifferenz zwischen der Substratoberfläche und der feuchten Luft ausgedrückt

⁵VDI Wärmeatlas - Wärmeübertragung bei Querströmung um einzelne Rohrreihen und durch Rohrbündel

ist, ihren größten Wert.

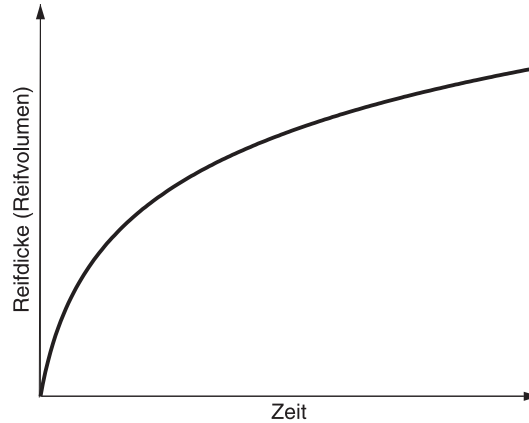


Abbildung 2.9: Reifdickeverlauf

Das bedeutet, dass der Massenstrom des aus der umgebenden feuchten Luft kondensierten Dampfs in der ersten Phase am größten ist. Nach der eindimensionalen Reifbildung entwickelt sich aus den Eiskristallen und feuchter Luft die poröse Reifstruktur, die aufgrund der Isolationswirkung der Reifschicht zur Minderung des Massenstroms des ausfallenden Wassers führt. Die Reifwachstumsgeschwindigkeit auf der gekühlten Substratoberfläche wird sich abhängig von der Reifdickezunahme verkleinern. Nach dem Erreichen eines stationären Zustands, d.h. gleicher Temperatur an der Phasengrenze, Reif (bzw. Wasser) und feuchte Luft, erreicht die Reifschicht ihre maximale Dicke.

Das während der Versuchsdauer entstehende Reifprofil ist von den variierenden Parametern abhängig. Die Substratoberflächentemperatur beeinflusst durch die Substratunterkühlung den Zuwachs des Massenstroms des ausfallenden Wassers und dementsprechend die Reifstrukturverdichtung und den Reifzuwachsprozess.

Die Luftgeschwindigkeit im Kanal, ausgedrückt als dimensionslose Reynoldszahl, und die Geometrie des Kanals beeinflussen das Geschwindigkeitsprofil der umströmenden feuchten Luft und durch den dynamischen Druck verstärken sie den Verdichtungsprozess in der Reifstruktur. Diese Wirkung ist besonders relevant bei der Reifbildung auf Rohroberflächen.

Mit größerem Durchmesser des Versuchskörpers und geringerer Kanalhöhe wird dieser Effekt verstärkt.

In der Fachliteratur findet man relativ wenige Publikationen, die sich auf Reifbildung an Rohroberflächen beziehen. Viele Forscher haben Reifbildungsversuche

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

auf ebenen Oberflächen durchgeführt. Korrelationsgleichungen für technische Anwendungen für ebene vertikale Platten als Funktion von variierenden Parametern haben u.a. Lee und Ro [47], Mao und Besant [52] und Schneider [69] hergeleitet. Lee und Ro [46] beweisen experimentell, dass man die auf gekühlten Rohroberflächen entstehende Reifdicke auch mit einer parabolischen Funktion beschreiben kann.

Eigene Versuche (des Autors dieser Arbeit) zeigen, dass das entstehende Reifprofil auf gekühlter Rohroberfläche einen unregelmäßigen Zuwachs erreicht. Die in der Abbildung 2.10 dargestellten Reifprofile wurden in zehnminütigen Abständen fotografiert.

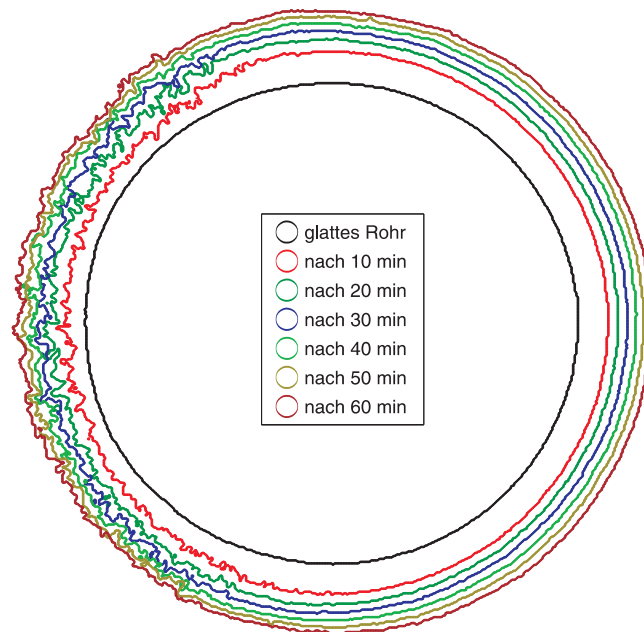


Abbildung 2.10: Zeitliche Entwicklung des Reifschichtprofils in einem einstündigen Versuch – Lufteintritt rechts, Austritt links

Es lässt sich beobachten, dass die wachsende Reifschicht in den ersten zehn Minuten im Vergleich zu den übrigen Zeitintervallen ihre maximale Wachstumsgeschwindigkeit erreicht. Mit zunehmender Versuchsdauer nimmt die Reifwachstumsgeschwindigkeit ab. Eine genaue Erklärung für dieses Phänomen und die Ermittlung des Zeitpunktes der maximalen Reifwachstumsgeschwindigkeit wird in Kapitel 4.3.5 gegeben. Am stromaufwärts zugewandten Umfang des gekühlten Rohres zeigt sich eine höhere lokale Dichte; zudem ist die Reifoberfläche dort glatter im Vergleich zur Reifstruktur auf der der Strömung abgewandten Rohrhälfte.

Die maximale Dicke der Reifschicht im Staupunkt, für die in dieser Arbeit definierten Standardparameter (siehe Tabelle 3.1, Kapitel 3) beträgt 2.34 mm .

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

Die Porosität und die Unregelmäßigkeiten der äußeren Schicht der Reifstruktur entstehen aufgrund der Störungen des Luftgeschwindigkeitsfelds und der Grenzschichtablösung.

Die optische Methode zur Bestimmung der Reifkontur wird in Kapitel 4.2.4 erläutert.

2.3.2 Mittlere Reifdichte

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wirkt die Reifschicht isolierend auf die Wärme- und Stoffübertragung zwischen der feuchten Luft und der gekühlten Substratoberfläche. Die Reifdichte bildet eine **zentrale Größe**, welche den Einfluss der variierenden Parameter auf die Eigenschaften der Reifstruktur beinhaltet. Darüber hinaus präsentieren viele Forscher die Wärmeleitfähigkeit des Reifes als Funktion der Dichte. Wegen der Verdichtung und Verdickung der Reifschicht ändert sich das Verhältnis der Eis- zur Luftmasse. Die Reifdichte steigt mit der Zunahme der Versuchsdauer und erlangt ihren maximalen Wert nach Erreichen eines thermodynamischen Gleichgewichtszustands zwischen der feuchten Luft und des Reifes. Das bedeutet in der Praxis, dass das Erreichen der Gleichgewichtstemperatur der äußeren Reifoberfläche einen weiteren Zuwachs der Reifschicht verhindert. Das Erreichen eines Gleichgewichtszustands ist von verschiedenen Parametern abhängig. Der Verlauf der zeitlichen Entwicklung der Reifdichte ist in Abbildung 2.11 dargestellt.

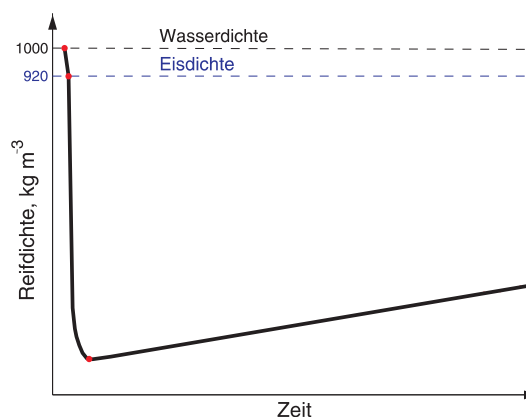


Abbildung 2.11: Reifdichteverlauf

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

In der Kondensationsphase (vgl. Abbildung 2.1) wird die maximale Dichte des flüssigen Wassers $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ erreicht. Am Ende dieser ersten Phase der Reifbildung, wenn die ausgebildeten Tropfen erstarren und am Anfang der zweiten Phase, wenn schon einzelne Eissäulen entstehen, beträgt die Dichte $\rho = 920 \text{ kg m}^{-3}$ und entspricht der Eisdichte. In der zweiten Phase der Reifbildung kommt es zur Entwicklung der porösen Struktur. Für die entstehende anfängliche Reifstruktur, die aus Eis und feuchter Luft in geschlossenen Poren besteht, erreicht die Reifdichte ein Minimum. Mit der Verdichtung der Reifschicht steigt die Dichte der Reifstruktur. Der zeitliche Reifdichteverlauf nähert sich dabei asymptotisch der Eisdichte nach dem Erreichen eines Gleichgewichtszustands.

Viele Experimentatoren haben sich mit den Messungen der Reifdichte befasst. Allgemein kann man die Messmethoden der Reifdichte in drei Gruppen unterteilen. Der erste Typ bezieht sich auf die direkte Messung der Reifmasse. Die Reifdichte wird dabei unter der Verwendung der coring- und scraping⁶-Methoden bestimmt, wobei ein Ausschnitt des porösen Festkörpers direkt vermessen und gewogen wird. Dabei ergibt sich ein relativ hoher Messfehler. Chung und Algren [13] haben Schmelz- und Absorptionsmethoden während Monaghan et al. [54] Wiegemethoden für die Bestimmung der Reifdichte eingesetzt. Direkte Messmethoden der lokalen Reifdichte wurden bisher kaum eingesetzt.

Die zweite indirekte Methode ermöglicht eine Berechnung der mittleren Werte der Reifdichte. Unter Verwendung einer kontaktfreien Messmethode zur Bestimmung der Reifkontur kann man für die gegebene Geometrie der Substratoberfläche das Reifvolumen bestimmen und dann für die gemessene Masse des Kondensates die mittlere Reifdichte ermitteln. Diese Methode wurde unter anderem von Lüer [49] und Langeheinecke [40] verwendet. Bei der dritten Methode wird unter Verwendung von Beta - und Gamma - Strahlung die lokale Reifdichte auf der Rohroberfläche bestimmt. Sie wurde u.a. von Bong et al. [9] und Cremens et al. [16] eingesetzt. Diese Methode ermöglicht eine Bestimmung der lokalen Dichte im Querschnitt der Reifschicht, und ihre Genauigkeit steigt mit der Zunahme der Reifschichtdicke. Nach Shin et al. [74] ist die Gliederung der Messmethoden der Reifdichte in Abbildung 2.12 dargestellt.

⁶direkte lokale Analyse der Reifdichte, Bronson [10] und Nakamura [56]

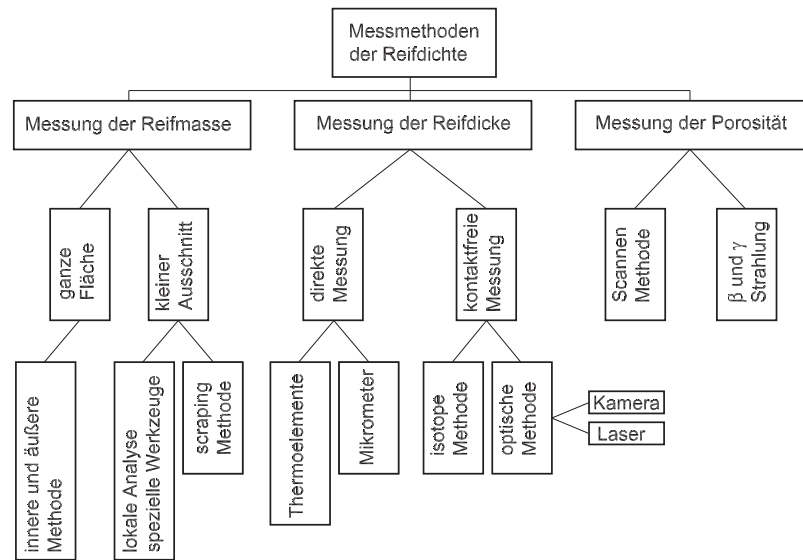


Abbildung 2.12: Gliederung der Messmethoden der Reifdichte [74]

Die in der Literatur vorhandenen Korrelationsgleichungen für die Ermittlung der Reifdichte berücksichtigen verschiedene Einflussfaktoren. Hayashi et al. [29] präsentiert eine Korrelationsgleichung für eine ebene Platte als Funktion der Oberflächentemperatur des Reifes. Hosoda und Uzuhashi [31] berücksichtigen nur den Einfluss der Substratoberflächentemperatur und Luftgeschwindigkeit im Kanal. Shin et al. [74] korrelieren die Reifdichte in Abhängigkeit vom Kontaktwinkel erstarrter Tropfen. In der Fachliteratur enthalten die vorhandenen Korrelationsgleichungen nur einen Einfluss von wenigen im Experiment angewandten Einflussgrößen aufgrund verschiedener Vereinfachungen und Begrenzungen in den experimentellen Versuchen. In den meisten Fällen sind die betrachteten Einflussgrößen unvollständig und repräsentieren nicht einen kompletten Parameterbereich.

Die Begrenzungen für die Realisierung vollständiger Parameterstudien beruhen in der Vergangenheit auf der Ungenauigkeit der Messgeräte. Überdies begrenzt auch die Konstruktion der Versuchsanlage den Parameterbereich der variierenden Einflussgrößen.

2.3.3 Wärmeleitfähigkeit des Reifes

In der Fachliteratur ist die Wärmeleitfähigkeit der Reifschicht in den meisten Fällen als Funktion der Reifdichte angegeben. Im Fall, dass die Korrelationsgleichung der ausgerechneten oder gemessenen Reifdichte den Einfluss aller variierenden Parameter berücksichtigt, ist die Wärmeleitfähigkeit auch von den Parameter abhän-

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

gig. Eine allgemeine Einteilung der Messmethoden der Wärmeleitfähigkeit ist nach Shin et al. [74] in Abbildung 2.13 präsentiert.

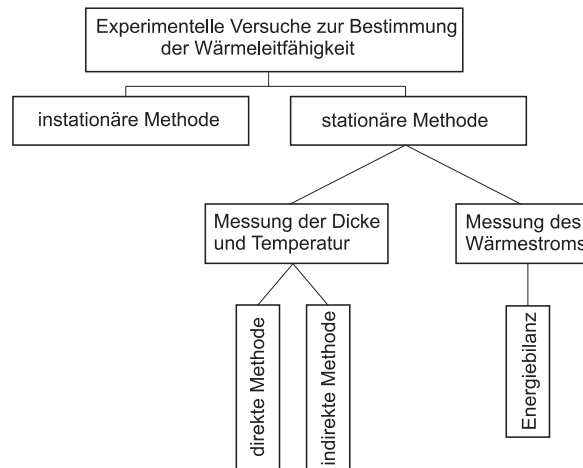


Abbildung 2.13: Gliederung der Messmethoden der Wärmeleitfähigkeit der Reifstruktur [74]

Die Wärmeleitfähigkeit der porösen Reifschicht ist von dem Massenanteil des Eises und der feuchten Luft abhängig. Für den instationären Prozess der Reifbildung, in dem neben der Verdickung auch die Verdichtung der porösen Struktur eine bedeutende Rolle spielt, ist die Wärmeleitfähigkeit nicht konstant und ändert sich über die Versuchsdauer.

Yonko und Sepsy [87], Sanders [66], Prins [62], Hosoda und Uzuhasashi [31], Lee et al. [45], Oscarsson et al. [60], Östin und Anderson [77] präsentieren die Wärmeleitfähigkeit als eine Funktion der Reifdichte für verschiedene Geometrien der Substratoberfläche und Versuchsparameter. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.14 dargestellt.

Die Wärmeleitfähigkeit der porösen Reifstruktur steigt mit zunehmender Dichte.

Eine theoretische Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Reifes, welche auf morphologischen Aspekten basiert, ist unter anderem von Dietenberger [18], Auracher [5] und Harraghy und Barber [27] durchgeführt worden.

Unter Verwendung des Begriffes der effektiven Wärmeleitfähigkeit und unter Berücksichtigung der Diffusion und der Wärmeleitung als Mechanismen der Wärme- und Stoffübertragung in der porösen Struktur hat Auracher [5] die Wärmeleitfä-

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

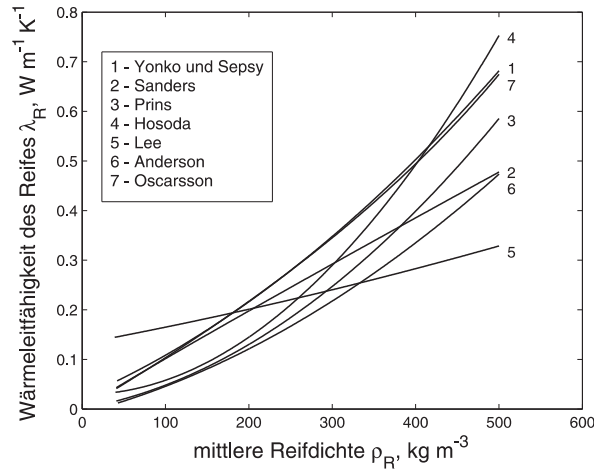


Abbildung 2.14: Wärmeleitfähigkeit des Reifes als Funktion der Reifdichte

higkeit der Reifstruktur analysiert. In Abhängigkeit von der Richtung des Wärmestroms in der Reifstruktur (vertikal oder horizontal) sind zwei mögliche Gleichungen zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit hergeleitet worden.

Dietenberger [18] unterscheidet zwischen Reif niedriger und hoher Porosität und leitet Korrelationsgleichungen für die effektive Wärmeleitfähigkeit des Reifes unter Berücksichtigung des diffusiven und latenten Wärmestroms für verschiedene Strukturmodelle her.

Sehr interessante Ergebnisse präsentieren Harraghy und Barber [27] (siehe Tabelle 2.2). Unter Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit von reinem Eis und feuchter Luft formulieren sie entsprechende Korrelationsgleichungen für mögliche Kombinationen verschiedener Strukturmodelle.





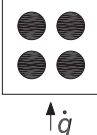
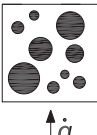
Die von den Autoren vorgeschlagenen Strukturmodelle haben verschiedene Verschaltungsmöglichkeiten und ermöglichen, abhängig von der Geometrie der Eissstruktur, die Berechnung oder eine Anpassung an experimentelle Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeit des Reifes.

Die mit diesen Strukturmodellen berechneten Werte für die Wärmeleitfähigkeit sind graphisch in Abbildung 2.15 dargestellt.

Im Anhang A wird genauer auf die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Reifes eingegangen.

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

Tabelle 2.2: Strukturmodelle zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit des Reifes λ_R in Abhängigkeit der Reifstruktur [27]

Modell	Gleichung
Parallel 	$\lambda_{R,pr} = \epsilon_R \lambda_P + (1 - \epsilon_R) \lambda_E$
Reihen 	$\lambda_{R,rh} = \left(\frac{\epsilon_R}{\lambda_P} + \frac{(1-\epsilon_R)}{\lambda_E} \right)^{-1}$
Kombination 	$\lambda_{R,kb} = \lambda_{R,rh} + A [\lambda_{R,pr} - \lambda_{R,rh}]$ $1 \geq A = \frac{V_{pr}}{V_{rh}} \geq 0$
Kubisch 	$\lambda_{R,ku} = \lambda_E \frac{1 + \epsilon_R^{2/3} \left(\frac{\lambda_P}{\lambda_E} - 1 \right)}{1 + (\epsilon_R^{2/3} - \epsilon_R) \left(\frac{\lambda_P}{\lambda_E} - 1 \right)}$
Kugel 	$\lambda_{R,kl} = \lambda_P \left[1 - \left(\frac{6(1-\epsilon_R)}{\pi} \right)^{1/3} \left(1 - \left(\frac{B^2-1}{B} \right) \ln \left(\frac{B+1}{B-1} \right) \right) \right]^{-1}$ $B = 1 + \left[0.25\pi \left(\frac{\lambda_E}{\lambda_P} - 1 \right) \left(\frac{6(1-\epsilon_R)}{\lambda_P} \frac{\lambda_E}{\lambda_P} \right)^{2/3} \right]^{-1/2}$
Zufall 	$\lambda_{R,zf} = 0.25 \left\{ (3\epsilon_R - 1) \lambda_P + (3(1 - \epsilon_R) - 1) \lambda_E + \left[((3\epsilon_R - 1)) \lambda_P + (3(1 - \epsilon_R) - 1) \lambda_E \right]^2 + 8\lambda_P \lambda_E \right\}^{1/2}$

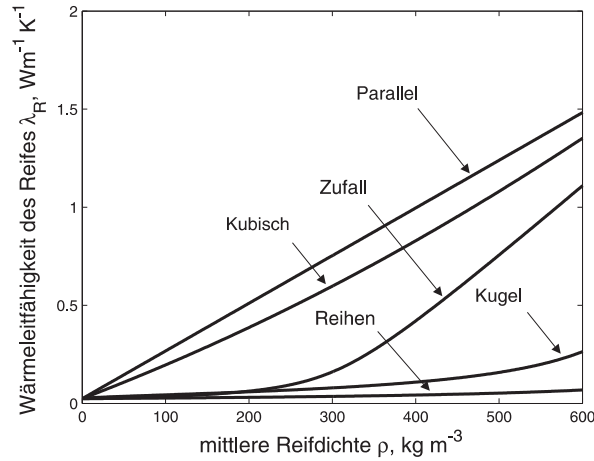


Abbildung 2.15: Wärmeleitfähigkeit des Reifes als Funktion der Reifdichte für verschiedene Strukturmodelle

2.3.4 Wärme- und Stoffübertragung

Die zunehmende Isolationswirkung der Reifschicht aufgrund der sich ändernden Dichte und Dicke während des Reifbildungsprozesses verringert die Wärmeübertragung zwischen der feuchten Luft und der gekühlten Substratoberfläche. Der übertragene Gesamtwärmestrom bei der Reifbildung besteht aus der Summe des fühlbaren und des latenten Anteils. Abhängig von der Art der Konvektion (freie oder erzwungene Konvektion) und der Geometrie der Substratoberfläche sind verschiedene mathematische Abhängigkeiten vorgeschlagen worden, die einen Zusammenhang der Nusseltzahl (Nu) mit anderen dimensionslosen Kennzahlen berücksichtigen. Nach Maryniuk [53] ist für freie Konvektion an einer vertikalen Rohroberfläche die Nusseltzahl

$$Nu = 0.73 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad (2.14)$$

als eine Funktion von Grashof- und Prandtlzahl, im Bereich der Rayleighzahl ($Ra = Gr \cdot Pr$) von 10^6 bis 10^7 gegeben.

Für erzwungene Konvektion an einer ebenen Platte im Reynoldszahlbereich von 23000 bis 115000 führen Hosoda und Uzuhashi [31] eine Korrelation für mittlere Nusseltzahl abhängig von der Reynolds- und Prandtlzahl mit entsprechenden Exponenten ein

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

$$\text{Nu}_m = 0.116 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.33}. \quad (2.15)$$

Ihre Versuchsergebnisse zeigen eine Verdopplung des Wärmeübergangskoeffizienten α durch die Bereifung der Substratoberfläche im Vergleich zur trockenen wärmeübertragenden Fläche.

Die Wärmeübertragung zwischen parallelen gekühlten Platten und der feuchten Luft hat O’Neal [57] mit folgender Gleichung beschrieben

$$\text{Nu} = 0.038 \cdot \text{Re}^{0.75} \cdot \text{Pr}^{0.33}. \quad (2.16)$$

Eine Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten um 60% gegenüber einer unbereiften Substratoberfläche wurde festgestellt.

Die Reynoldszahl in Gleichung (2.16) basiert auf dem hydraulischen Durchmesser des Kanals. Diese Gleichung ist gültig für Reynoldszahlen im Bereich von 4400 bis 45100.

O’Neal [57] und Yamakawa et al. [85] leiteten für ebene Platten eine Abhängigkeit der Nusseltzahl von der mittleren Reynoldszahl (Re_m) im Bereich von 6000 bis 50000 von ihren Ergebnissen ab.

$$\text{Nu} = 0.034 \cdot \text{Re}_m^{0.8} \quad (2.17)$$

Die mittlere Reynoldszahl berücksichtigt den ändernden hydraulischen Durchmesser während der Versuchsdauer.

Kamai et al. [35] führt eine Nusselt-Beziehung für einen durchströmten Ringspalt ein und beschreibt die Abhängigkeit mit folgender Gleichung

$$\text{Nu} = 0.018 \cdot \text{Re}_m^{0.8} \quad (2.18)$$

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

im Bereich von Reynoldszahl zwischen 6800 und 37000.

Interessante Ergebnisse präsentieren Chung und Algren [13] für einen querangeströmten Zylinder. Für die Umströmung eines bereifenden, quereingebauten Rohres leiten die Autoren die Nusseltzahlen für den instationären und stationären Bereich des Experiments her. Unter Verwendung der Nusseltzahl für den stationären Bereich

$$\text{Nu}_\infty = 0.394 \cdot \text{Re}^{0.509} \quad (2.19)$$

kann man die momentane Nusseltzahl (Nu_τ) ermitteln

$$\frac{\text{Nu}_\tau}{\text{Nu}_\infty} = 1 + 0.23 \cdot e^{(-\frac{\tau}{23.1})}. \quad (2.20)$$

Die Ergebnisse werden qualitativ für konstante Werte der Luft- und Substratoberflächentemperatur sowie des Wassergehalts in Abbildung 2.16 gezeigt.

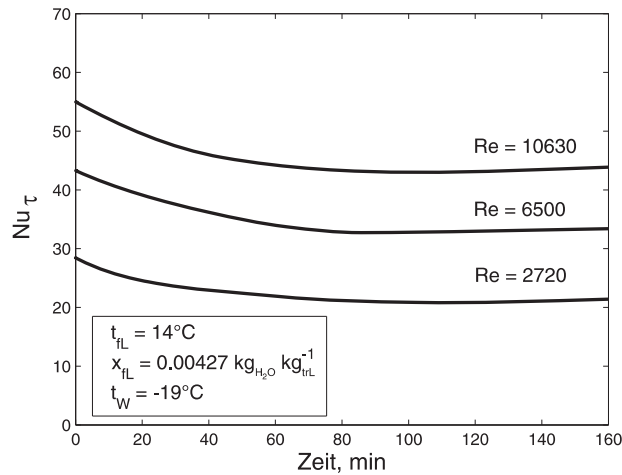


Abbildung 2.16: Instationäre Nusseltzahl als Funktion der Zeit an einem querangeströmten Rohr (Quelle: Chung und Algren [13] zitiert von O’Neal und Tree [59])

Es lässt sich feststellen, dass die Wärmeübertragung mit der Versuchsdauer abnimmt und nach 90 Minuten ein stationärer Zustand erreicht wird.

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

Aufgrund der Vergrößerung der äußeren Oberfläche der porösen Reifstruktur steigt der übertragene Wärmestrom. Überdies ist die Wärmeübertragung bei turbulenter Strömung deutlich intensiver als bei laminarer Strömung.

Betty et al. [7] ermitteln experimentell eine Vergrößerung der Wärmeübergangskoeffizienten im Bereich von 60% bis 120% unter Berücksichtigung der Desublimationsenthalpie⁷.

Die Analogie der Wärme- und Stoffübertragung umfasst den Zusammenhang zwischen dem Wärmeübergangskoeffizienten und dem Stoffübergangskoeffizienten. Einer der Zusammenhänge wird beschrieben durch die Korrelationsgleichung von Chilton - Colburn für eine turbulente Strömung im Rohr, ist aber auch für andere Fälle anwendbar wie z. B. bei querangeströmten Rohren, Wärme- und Stoffübertragung in porösen Körpern und parallel angeströmten ebenen Platten

$$\frac{\alpha}{c_p} \cdot \text{Pr}^{2/3} = \beta \cdot \rho \cdot \text{Sc}^{2/3}. \quad (2.21)$$

Die mathematische Herleitung der Wärme- und Stoffanalogie von Lewis (Gl. 2.22), unter Berücksichtigung einer treibenden Kraft für die Wärme- und Stoffübertragungsprozesse, gibt eindeutige Ergebnisse für feuchte Luft mit Lewis-Zahl $\text{Le} = 0.87$ (nach Baehr und Stephan [6])

$$\frac{\alpha}{\beta} = \rho \cdot c_p \cdot \text{Le}^{2/3}. \quad (2.22)$$

Ein empirisches Modell, welches auf der Lewis-Analogie basiert, wird beispielsweise von Sherif [73] und Lee [42] verwendet. Die ersten Veröffentlichungen, präsentiert von Schropp [71] und Hofmann [30], beschreiben durch das Lewissche Gesetz den Zusammenhang der Wärme- und Stoffübertragung. Sanders [65] berücksichtigt zusätzlich in der Gleichung (2.22) einen Korrekturfaktor, um den Wärmeübergangskoeffizient zu korrigieren. Spätere experimentelle Untersuchungen von Chung und Algren [13], Hosoda und Uzuhashi [31] für verschiedene Geometrien, weisen darauf hin, dass das Verhältnis des Wärme- und Stoffübergangs besser mittels der Chilton

⁷vgl. Langeheinecke [40]

- Colburn Analogie ausgedrückt werden kann.

Beide Gleichungen finden praktische Anwendung und sie können für verschiedene Fälle verwendet werden.

2.3.5 Einfluss der Struktur der Substratoberfläche auf Reifbildungsvorgänge

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Struktur der Substratoberfläche auf die Reifbildungsvorgänge besprochen. Die Rauheit und die Benetzungseigenschaften der Oberfläche beeinflussen schon in der Keimbildungsphase die spätere Entwicklung der Reifstruktur. Mit zunehmender Rauheit kommt es zu einer stärkeren Tropfenverteilung auf der gekühlten Substratoberfläche und einer schnelleren Erstarrung. Die Ursache dieses Phänomens liegt in der Keimbildung und wurde näher in Kapitel 2.1 diskutiert.

Sehr interessante Erscheinungen werden auf einer hydrophoben selbstreinigenden Lotus[®]-Oberfläche⁸ beobachtet (Abb. 2.17).

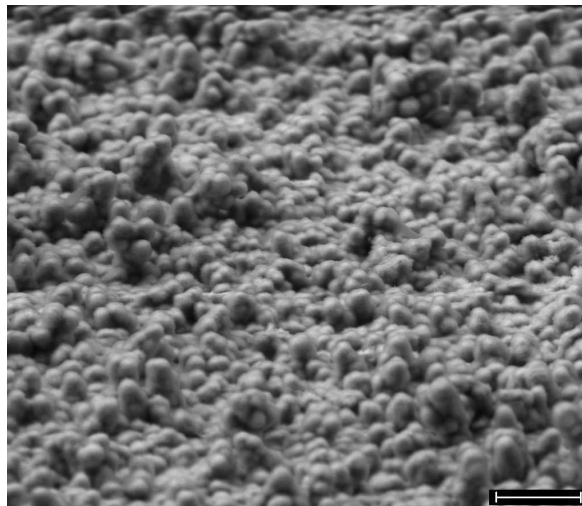


Abbildung 2.17: Superhydrophobe selbstreinigende Lotusoberfläche - Benetzungswinkel im Tropfen $\Theta \geq 160^\circ$ – Maßstab - $20\mu m$

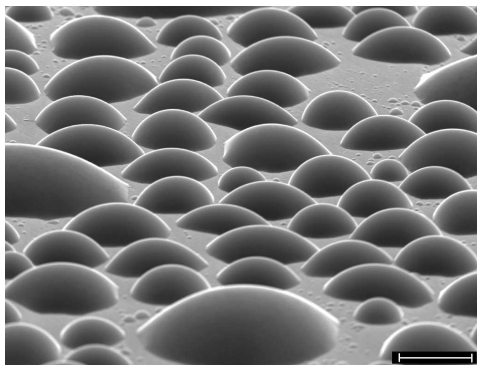
⁸www.lotus-effekt.de, siehe auch Barthlott [11]

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

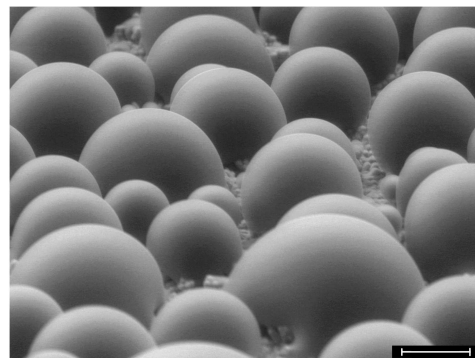
Die Wassertropfen haben wie alle Flüssigkeiten aufgrund von Kohäsionskräften eine Tendenz zur Minimierung ihrer Oberfläche und bilden daher Kugelformen. Bei Kontakt mit einer Substratoberfläche spielen die Adhäsionskräfte eine wichtige Rolle, so dass es zur Benetzung der Oberfläche kommt. Theoretisch ist es möglich, zwei Grenzfälle zu beschreiben. Es kann zur vollständigen Benetzung kommen, wenn die Adhäsionskräfte gegenüber den Kohäsionskräften überwiegen. Im umgekehrten Fall, wenn die Kohäsionskräfte gegenüber den Adhäsionskräften überwiegen, ist eine unvollständige sowie auch keine Benetzung möglich. Der Lotuseffekt nutzt eine hydrophobe Oberflächenstruktur mit geringen Adhäsionskräften. Bei Flüssigkeiten mit hoher Oberflächenspannung überwiegen die Kohäsionskräfte innerhalb der Flüssigkeit gegenüber den Adhäsionskräften und es kommt zu einer minimalen Benetzung der Substratoberfläche.

Darüber hinaus basiert die Bewegung der Tropfen auf den hydrophoben Lotusoberflächen nicht nur auf der Translation, sondern auch auf der Rotation, welche eine Selbstreinigung von Oberflächen ermöglicht. Ein Tropfen nimmt beim Abrollen die aufliegenden Schmutzpartikel mit und reinigt zugleich die Substratoberfläche.

In Abbildung 2.18 sind Rasterelektronenmikroskopaufnahmen⁹ von Wassertropfen während der Tropfenkondensation gezeigt.



(a) Kupferoberfläche $R_a = 0.07\mu m$ – Maßstab - $20\mu m$



(b) hydrophobe Lotusoberfläche $\Theta \geq 160^\circ$ – Maßstab - $20\mu m$

Abbildung 2.18: Tropfenkondensation auf Substratoberflächen

Die Temperatur der Substratoberflächen liegt oberhalb der Erstarrungstemperatur des Wassers. Daher können die Tropfen ihr maximales Volumen erreichen und erstarren nicht während der Tropfenwachstumsphase. Die Tropfen auf der Lotus-

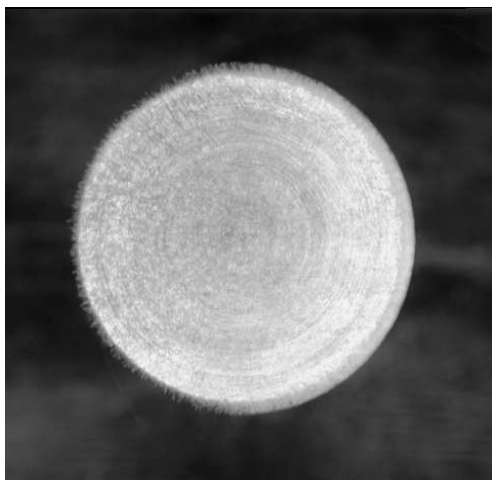
⁹ESEM - Environmental Scanning Electron Microscope an der TU Darmstadt am FG Umweltmineralogie

2.3 Einflussfaktoren und physikalische Eigenschaften der Reifstruktur

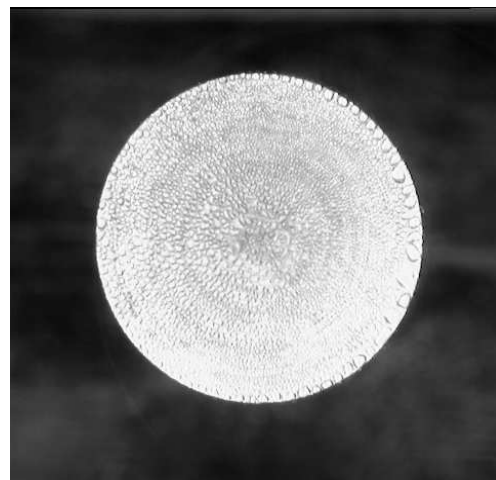
oberfläche haben im Vergleich zur polierten hydrophilen Kupferoberfläche einen kugelförmigen Umriss, größeres Eigenvolumen und eine kleinere Benetzungsfläche. Während der Reifbildung liegt die Temperatur der gekühlten Substratoberfläche unterhalb der Erstarrungstemperatur des Wassers. Abhängig von der Substratunterkühlung ΔT_S kommt es zur Keimbildung. Die auf der Substratoberfläche entstehenden Mikrotropfen nehmen gemäß der Theorie der Tropfenkondensation zu und erstarren vor dem Erreichen des kritischen Radius. Zwei gleichzeitig stattfindende instationäre Prozesse, die Kondensation mit dem Tropfenwachstum und die Tropfenabkühlung beeinflussen die Dynamik des Erstarrungsprozesses.

Im Rahmen dieser Doktorarbeit wurden Versuche auf hochgenau gefertigten Kupferrohren durchgeführt. Die Rohrbearbeitung besteht aus Polieren und Entfetten der oxidierten und rauen Substratoberfläche. Die mittlere Rauheit nach dem Polieren beträgt $R_a = 0.04 \mu m$. Die Notwendigkeit dieser Maßnahmen zeigt der Vergleich zweier Bilder der Reifbildung nach 270 s für zwei Kupferrohre des Durchmessers $d=15 \text{ mm}$.

In Abb. 2.19(a) lässt sich nach dieser Zeit eine ausgebildete Reifschicht beobachten.



(a) Reifbildung - gereinigtes Rohr



(b) Reifbildung - oxidiertes Rohr

Abbildung 2.19: Reifbildung auf gekühlten Rohroberflächen nach 270 Sekunden

Die oxidierte Substratoberfläche des Kupferrohres wurde kurz vor dem Versuch poliert und gereinigt. Der Einfluss der Oxidation der Substratoberfläche auf die Reifbildung ist in Abbildung 2.19(b) gezeigt. Es ist zu erkennen, dass nach der gleichen Versuchsdauer der Erstarrungsprozess noch nicht begonnen hat. Der Oxidationsprozess beeinflusst die Benetzungseigenschaften der Substratoberfläche.

2.4 Modelle der Reifbildung

Die Tropfen erstarren später und haben ein größeres Eigenvolumen. Größere erstarrte Tropfen erhöhen wegen der besseren Wärmeleitfähigkeit den übertragenen Wärmestrom zwischen der feuchten Luft und der Substratoberfläche und beeinflussen zugleich negativ die Reproduzierbarkeit der Reifeigenschaften.

2.4 Modelle der Reifbildung

In diesem Kapitel werden Modelle der Reifbildung präsentiert. Die mathematische Modellierung des Reifbildungsprozesses ist ein nicht triviales Problem. In der Fachliteratur kann man viele Reifbildungsmodelle finden, die auf verschiedenen Annahmen basieren. In einem vollständigen Reifbildungsmodell gilt es zwei Phasenumwandlungen im instationären Reifbildungsprozess zu berücksichtigen: Die Tropfenkondensation des Dampfes unter Berücksichtigung der Keimbildungsphase mit Tropfenzuwachs und die Erstarrung der ausgebildeten Wassertropfen nach Erreichen des kritischen Radius. Darüber hinaus müssen die physikalischen Phänomene der porösen Reifschicht, der Verdickungs- und Verdichtungsprozess mathematisch beschrieben und im Modell berücksichtigt werden. Beispielhaft ist in Abbildung 2.20 ein eindimensionales mathematisches Modell dargestellt, welches von Lier [49] und Langeheinecke [40] verwendet und analysiert worden ist.

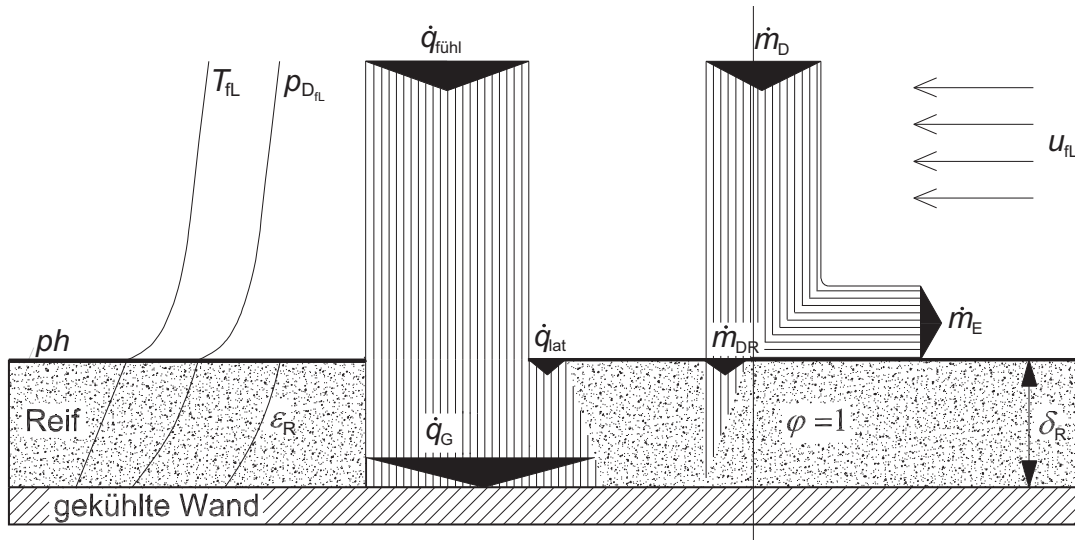


Abbildung 2.20: Reifbildungsmodell

In diesem Modell wird die Tropfenkondensation zu Beginn des Prozesses nicht berücksichtigt. Unter der Annahme einer sehr dünnen Reifschicht ($\delta_R \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$)

2.4 Modelle der Reifbildung

und einer geringen Dichte ($\rho_R \approx 8 \dots 48 \text{ kg m}^{-3}$) kann die Reifbildung mathematisch beschrieben werden.

Das Reifbildungsphänomen wird in diesem Modell in zwei separate Prozesse der Wärme- und Stoffübertragung eingeteilt. Der auf der Reifschicht kondensierende Wasserdampfmassenstrom spaltet sich in einen die Reifsicht verdichtenden und einen verdickenden Anteil auf.

Durch die Kapillarkräfte dringt ein Massenstrom des Wassers \dot{m}_{DR} in die poröse Reifschicht, erstarrt und verdichtet zugleich die Reifstruktur. Der Mechanismus dieses Phänomens ist einfache Diffusion und lässt sich mit dem Fick'schen Gesetz beschreiben. Unter der Annahme, dass der Wasserdampf als ein ideales Gas betrachtet werden kann, und unter Verwendung der Clausius - Clapeyron'schen Gleichung für die Beschreibung der Phasenumwandlung des Wasserdampfes an der Phasengrenze ph kann man die diffundierte Dampfmassenstromdichte wie folgt ausdrücken:

$$\dot{m}_{DR} = -D_{DR} \cdot \left(\frac{p_{DR}}{R_D \cdot T_R^2} \right) \left(\frac{r_{lat}}{R_D \cdot T_R} - 1 \right) \frac{\partial T_R}{\partial y} \Big|_{ph}. \quad (2.23)$$

Die Massenstromdichte \dot{m}_E dringt nicht in die poröse Reifstruktur ein, sondern bildet auf der Reifoberfläche neue Keime für die Kristallwachstumsphasen und verdickt die poröse Reifschicht.

Die verdickende Massenstromdichte resultiert aus der Stoffbilanz über die gesamte \dot{m}_D und die diffundierte Dampfmassenstromdichte \dot{m}_{DR}

$$\dot{m}_E = \dot{m}_D - \dot{m}_{DR} = \rho_E \cdot \dot{\delta}_R. \quad (2.24)$$

Für die konvektive Stoffübertragung des Dampfes gilt,

$$\dot{m}_D = \beta_D \cdot (\rho_{D_{fL}} - \rho_{D_{ph}}). \quad (2.25)$$

Die feuchte Luft in den Mikroporen befindet sich im Sättigungszustand.

2.4 Modelle der Reifbildung

Die Gesamtwärmestromdichte \dot{q}_G lässt sich ähnlich wie der gesamte Dampfmassestrom in zwei separate Wärmeströme unterteilen

$$\dot{q}_G = \dot{q}_{f\ddot{u}hl} + \dot{q}_{lat}. \quad (2.26)$$

Die Triebkraft des Wärmeübertragungsprozesses, definiert als die Differenz von Luft- und Reifoberflächentemperatur, beeinflusst die übertragene fühlbare Wärmestromdichte

$$\dot{q}_{f\ddot{u}hl} = \alpha \cdot (T_{fL} - T_{fL_{ph}}). \quad (2.27)$$

Um die fühlbare Wärmestromdichte zu ermitteln, muss der Wärmeübergangskoeffizient α aus einer geeigneten Korrelation für die betreffenden Randbedingungen der konvektiven Wärmeübertragung und der Geometrie verwendet werden.

Daneben ist die durch die Verdickung der Reifschicht latente Wärmestromdichte zu berücksichtigen

$$\dot{q}_{lat} = r_{lat} \cdot \dot{m}_E. \quad (2.28)$$

Die Art der Phasenumwandlung auf der gekühlten Substrat- oder Reifoberfläche ist von dem Druck und der Temperatur des Wasserdampfs und der Substratunterkühlung abhängig.

Für geringe Substratunterkühlung ($\Delta T_S \leq 40 \text{ K}$, siehe Kapitel 2.1) und wenn die Parameter des Dampfes in der feuchten Luft oberhalb des Tripelpunkts des Wassers liegen, kommt es zur Kondensation und danach Erstarrung. Bei größeren Unterkühlungen $\Delta T_S \geq 40 \text{ K}$ und wenn die Parameter des Dampfes unterhalb des Tripelpunkts liegen, kommt es zu direkter Desublimation.

2.4 Modelle der Reifbildung

Ein eindimensionales Modell wird beispielsweise von Lee et al. [43], Sherif et al. [73], Ismail und Salinas [33] verwendet, in dem zusätzlich der Zusammenhang zwischen Wärme- und Stoffübertragung mittels der Lewis - Analogie berücksichtigt ist. In der Literatur lassen sich auch andere mathematische Modelle zur Berechnung der Reifparameter finden: Yang et al. [86] verwenden ein Standard k - ϵ Modell für die Simulation einer turbulenten Luftströmung und die Diffusionsgleichung für die Stoffübertragung des Dampfes. Raju und Scherif [63] sowie Lüer [49] berechnen die Reifparameter unter Verwendung eines mathematischen Modells, welches auf Energie-, Impuls- und Stoffbilanzgleichungen basiert. Die angewandten mathematischen Modelle zur Reifbildung werden in den Doktorarbeiten von Lüer [49] und Langeheinecke [40] umfassend beschrieben.

2.4.1 Tropfenkondensationsphase

Die Unregelmäßigkeiten und Rauheiten der gekühlten, unterhalb der Sättigungstemperatur liegenden Substratoberfläche bilden die Kondensationskeimstellen. Wenn das Kondensat nicht vollständig die Wand benetzt, bilden sich auf der Substratoberfläche einzelne Flüssigkeitstropfen mit deutlich größeren Wärmeübergangskoeffizienten als bei der Filmkondensation (siehe Stephan [75]). In der Fachliteratur existieren mehrere Theorien über die Tropfenkondensation. Die ersten experimentellen Untersuchungen (Schmidt [67]) weisen darauf hin, dass der Wärmeübergangskoeffizient für Tropfenkondensation deutlich größer ist, als für Filmkondensation. Der Mechanismus der Stoffübertragung wird jedoch nicht beschrieben. Eucken [19] untersucht, in seiner Publikation aus dem Jahr 1937, den Mechanismus bei der Wärmeübertragung. Die Theorie geht von der Vorstellung aus, dass sich aus der zunächst gebildeten übersättigten monomolekularen Adsorptionsschicht in der Keimbildungsphase kleine Mikrotröpfchen bilden, die durch Oberflächendiffusion, bei der am Tropfenrand ständig neues Kondensat zufließt, zuwachsen (siehe Abb. 2.21).

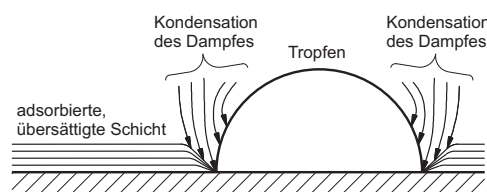


Abbildung 2.21: Tropfenkondensationsprozess nach Eucken [19]

2.4 Modelle der Reifbildung

Eine Theorie von Jacob [34] (analysiert auch von Umur [82], Kirscher und Grigull [38] und Wenzel [84]) setzt voraus, dass zwischen den Tröpfchen ein sehr dünner instabiler Film existiert, der beim Erreichen einer kritischen Dicke (von wenigen μm) aufreißt und in den Tropfen verschwindet. Darüber hinaus ist die Wachstumsgeschwindigkeit von Einzeltropfen von der treibenden Temperaturdifferenz und dem Radius abhängig. Die steigende Differenz zwischen der Lufttemperatur und der Substratoberflächentemperatur (treibende Kraft des Kondensationsprozesses) beeinflusst die Dynamik der Stoff- und Wärmeübertragung in der Tropfenwachstumsphase.

2.4.2 Kristallwachstumsphasen

Mit dem eindimensionalen Kristallwachstum auf erstarrten Tröpfchen beginnen die Kristallwachstumsphasen (siehe Abb. 2.1). Ein numerisches Modell von Tao und Bessant [78] zur Berechnung des Eissäulenzuwachses basiert auf der konvektiven Wärme- und Stoffübertragung und ermöglicht eine Prognose der späteren, ausgebildeten Reifwachstumsphase. Die Autoren teilen die Reifbildung in zwei Phasen ein. Zu Beginn ist die Reifbildung durch Anwachsen der Eissäulen charakterisiert. Der Übergang am Ende der Tropfenkondensation zum Beginn des eindimensionalen Kristallwachstums wird als die erste Transitionszeit bezeichnet. Die zweite Phase berücksichtigt das ausgebildete Reifschichtwachstum und die zweite Transitionszeit, welche als das Zeitintervall zwischen dem Kristallwachstum und dem anfänglichen Reifschichtwachstum definiert ist. Unter der Annahme, dass die Reifssäulen zylindrisch sind und aus Eiskristallen bestehen, die feuchte Luft in der Nähe der Eissäulen gesättigt ist, die Lufttemperatur in den freien Räumen zwischen den Säulen gleich der Eistemperatur ist und die Wärmeleitfähigkeit der Reifstruktur als eine Funktion der Reifdicke ausgedrückt werden kann, hat Sahin [64] ein einfaches Modell für den Kristallzuwachs entwickelt. Als Mechanismus der Stoffübertragung wird die Diffusion des Wasserdampfs innerhalb der porösen Reifstruktur angenommen.

2.4.3 Reifschichtwachstumsphase

In der Literatur existieren viele numerische sowie empirische Modelle für die Beschreibung der Reifschichtwachstumsphase. Beispielsweise präsentiert Schneider [69] ein empirisches Modell zur Berechnung der mittleren Reifdicke der ausgebildeten Reifschicht. Lee und Ro [48] analysieren den Reifschichtzuwachs und betrachten

2.4 Modelle der Reifbildung

die Reifschicht als eine poröse Struktur. In diesem Modell wird das Ficksche Gesetz verwendet, um die Stoffübertragung in der Reifstruktur zu beschreiben, und die Lewissche Analogie zur Beschreibung des Zusammenhangs der Wärme- und Stoffübertragung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die mathematischen Modelle zur Reifschichtwachstumsphase auf der Idee eines eindimensionalen Modells basieren, in dem der Gesamtwärme- und Massenstrom in zwei separate Ströme geteilt ist. Ein Teilstrom des Kondensates erstarrt auf der Reifoberfläche, verdickt die poröse Reifschicht und erhöht die oberflächliche Reifschichttemperatur derart, dass periodische Temperaturschwankungen auftreten und der melt-back Effekt intensiviert wird. Der zweite Teilmassenstrom diffundiert innerhalb des Reifes und verdichtet die poröse Reifstruktur. Der Zusammenhang zwischen Wärme- und Stoffübertragung kann mit Lewis – oder Chilton – Colburn Analogie ausgedrückt werden. Die mathematische Modellierung der Reifschichtentwicklung lässt sich als Problem der instationären Wärme- und Stoffübertragung eines porösen Körpers mit variabler Dichte beschreiben.

Kapitel 3

Ziel der Arbeit und Ableitung eines Versuchsprogramms

Aus dem derzeitigen Stand des Wissens wird klar, dass schon umfangreiche Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Reifbildung stattgefunden haben. Relativ wenige Arbeiten umfassen experimentelle Untersuchungen der Reifbildung auf Rohroberflächen.

Die Entwicklung der Messtechnik hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Neue optische Messmethoden zur Bestimmung der Geometrie der Reifschicht und präzise Feuchtigkeitssensoren ermöglichen genaue Messungen der Reifdicke und der Masse des kondensierenden Dampfes.

Neue hydrophobe Strukturen und ihre potenzielle Anwendungsmöglichkeiten in der Kältetechnik als wärmeübertragende Substratoberfläche wurden noch nicht vollständig untersucht. Interessant wäre es zu wissen, ob die Substratoberflächen mit hydrophoben Eigenschaften den Isolierungseffekt der wachsenden Reifschicht verringern können.

Die vorhandene Fachliteratur umfasst keine vollständige Parameterstudie, welche den Einfluss von allen möglichen physikalischen Größen auf die wichtigsten Reifparametern enthält.

Neben den experimentellen Arbeiten entstanden auch mathematische Modelle in Form von Korrelationsgleichungen für die wichtigsten Parameter der Reifstruktur.

Aus diesen Feststellungen lässt sich als Ziel der vorliegenden Arbeit ableiten, möglichst tiefgehende experimentelle Untersuchungen der Reifbildung auf Rohroberfläche durchzuführen und dann entsprechende Korrelationsgleichungen für die Reifstruktur herzuleiten.

Das Versuchsprogramm umfasst eine Einflussanalyse von folgenden variierenden Parametern auf die Reifstruktur:

- Lufttemperatur T_g
- relative Luftfeuchtigkeit rF
- Substratoberflächentemperatur T_w
- Reynoldszahl im Kanal Re_∞
- Struktur und Rauigkeit der Substratoberfläche SR
- Geometrie des Kanals s
- Durchmesser des Versuchskörpers d
- Zeit τ .

Folgende nachstehend aufgeführte physikalische Größen werden ausgerechnet:

- mittlere Reifdichte $\bar{\rho}_R$
- Reifvolumen V_R
- Reifwachstumsgeschwindigkeit \dot{V}_R
- Masse M_K und Massenstrom \dot{M}_K des kondensierten Dampfes
- Gesamtwärmestrom \dot{Q}_G .

Als Versuchskörper wurde ein Kupferrohr mit einem Durchmesser von 15 mm genommen. Die Kanalhöhe der Versuchsanlage ($s = 24 \text{ mm}$) begrenzt die Anwendung eines Rohres mit höheren Durchmesser. Ein Versuchskörper mit einem geringeren Durchmesser wird den Massenstrom des kondensierenden Dampfes reduzieren und dementsprechend den Messfehler vergrößern.

Das im Kanal quer eingebaute Rohr kann als Ausschnitt eines Rohrbündels betrachtet werden (Abb. 3.1), da die Randbedingungen an der Kanalwand den Symmetriebedingungen beim Rohrbündel entsprechen (siehe Anhang B).

Die Kanalhöhe s entspricht der Distanz zwischen zwei Rohren derselben Reihe (siehe Abb. 3.1). Die Viskosität der durchströmten Luft beeinflusst durch die Reibung das Geschwindigkeitsprofil.

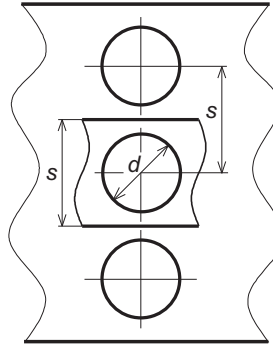


Abbildung 3.1: Ausschnitt aus einem Rohrbündel mit schematischer Darstellung des Kanals

In der dünnen laminaren Grenzschicht an der Kanalwand ist die Luftgeschwindigkeit gleich null. Im Vergleich mit einer realen Durchströmung eines Gases durch das Rohrbündel wird das Geschwindigkeitsprofil deformiert. Der Unterschied zwischen beiden Luftgeschwindigkeitsprofilen nimmt mit steigender Reynoldszahl der durchströmten Luft zu.

Die Korrelationsgleichungen werden für die wichtigsten Reifparameter hergeleitet und ihre Ergebnisse graphisch dargestellt. Diese Gleichungen ermöglichen die Berechnung der mittleren Reifdichte $\bar{\rho}_R$ sowie der Masse des ausfallenden Wassers M_K und stellen einen Zusammenhang zwischen der unbekannten physikalischen Größe und den variablen Einflussparametern dar. Die Korrelationsgleichungen sind insbesondere für industrielle Anwendungen geeignet.

Alle variablen Einflussparameter der Versuche sind mit ihren Variationsbereichen in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tabelle 3.1: Versuchsprogramm

Versuchsparameter		Parameterwerte						
rF	%	30	40	50	60	70	80	
T_{fL}	K				295.15	298.15	301.15	
T_w	K			266.15	263.15	260.15	257.15	
Re_∞	—			700	800	900	1000	1100
SR	—				C1	C2	C3	L1
s	mm				24	34	44	

Um das Versuchsprogramm einzugrenzen werden nicht für alle möglichen Parameterkombinationen Experimente durchgeführt. Daher werden für einen festen Parametersatz (als Standardversuch bezeichnet) jeweils $(n - 1)$ Einflussgrößen konstant gehalten und nur eine Einflussgröße variiert. Die Standardparameter sind mit fetter Schrift kenntlich gemacht.

Die Symbole für die Rauheit und die Struktur werden in Tabelle 3.2 erläutert.

Tabelle 3.2: Rauhigkeit und Struktur der Substratoberfläche

Bezeichnung	—	C1	C2	C3	L1
Rauhigkeit/Struktur	$\mu m/^\circ$	$R_a = 0.04$	$R_a = 1.89$	$R_a = 5.17$	$\Theta > 160^\circ$

Jede gegebene Versuchskombination des 60 Minuten andauernden Versuchs wird zwischen 3 bis 5 Mal wiederholt, um die Standardabweichung der gemessenen und berechneten physikalischen Größen berechnen zu können.

Kapitel 4

Versuchsanlage

In diesem Kapitel werden die Versuchsanlage und das verwendete Messsystem beschrieben. Der Versuchsstand wurde von Lür [49] und Langeheinecke [40] übernommen und modifiziert. Der Umbau der Anlage - Messstrecke mit neuer Messeinheit und neuen Messgeräten, neue Auslaufstrecke und Luftkonditionierungssektion - ermöglicht eine stabilere Durchführung der experimentellen Versuche der Reifbildung an gekühlten Rohroberflächen und verbessert ihre Reproduzierbarkeit.

4.1 Aufbau des Versuchsstands

Der Versuchsstand besteht aus folgenden Bestandteilen:

- Luftkonditionierungseinheit KE , in der die aus der Umgebung angesaugte frische Luft befeuchtet und erwärmt wird
- Strömungsaufbereitungssektion SE , mit Beruhigungskammer und Anlaufstrecke, womit ein laminares Luftgeschwindigkeitsprofil erreicht wird
- Messektion MS , mit eingebautem Versuchskörper und Messgeräten sowie Kühlmobil
- Luftauslaufsektion AS , mit Auslaufstrecke, Sauggebläse, Durchflussmesser und Feuchtigkeitssensor

Die Versuchsanlage ist schematisch in Abbildung 4.1 gezeigt und wird in drei Kreisläufe aufgeteilt. Im primären Kreislauf wird das Arbeitsmedium (feuchte Luft) aus der Umgebung zur Luftkonditionierungseinheit angesaugt, wo Befeuchtung, Trocknung und Erwärmung erfolgen. Am Austritt aus der Rieselkolonne verlässt

4.1 Aufbau des Versuchstands

die vorbereitete feuchte Luft mit einer bestimmten, konstanten Temperatur und relativen Feuchtigkeit die Luftkonditionierungseinheit KE .

Im nächsten Schritt wird die feuchte Luft der 6 Meter langen Strömungsaufbereitungssektion SE zugeführt, wodurch das Luftgeschwindigkeitsprofil stabilisiert und eine laminare Strömung erreicht werden.

Die Lufttemperatur nimmt am Ende der Strecke ab. Um die Lufttemperatur zu erhöhen und auf konstantem Niveau zu halten, sind zusätzlich zwei Heizfolien HF-SE¹⁰ auf der Strömungsaufbereitungssektion des Kanals aufgeklebt. Die Heizfolien temperieren die Luft am Eintritt zur Messsektion.

Die Messstrecke mit dem quereingebauten Rohr ist aus transparentem Plexiglas gefertigt. Dies ermöglicht eine Beobachtung des Reifschichtprofils von der Vorderseite des Rohres unter Verwendung einer optischen, berührungsfreien Methode (CCD – Kamera).

Das Plexiglas besitzt im Vergleich zum Aluminium eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{Plexi} \approx 0.19 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, $\lambda_{Al} \approx 200 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), zeigt also eine bessere Isolationswirkung und führt zu einer höheren Reproduzierbarkeit der Versuche.

Der erste Feuchtigkeitssensor FS1 misst die Parameter der feuchten Luft am Eintritt zur Messsektion MS . Die Temperatur und die relative Feuchtigkeit an diesem Messpunkt sind während des einstündigen Versuchs konstant gehalten.

Der im Kanal quer eingebaute Versuchskörper wird mit einem 30% Antifrogen N–Wasser–Gemisch mittels Kühlmobil (siehe Tab. 4.1) gekühlt. Das Kältemittel aus dem Kühlmobil strömt durch den Kältemittelverteiler V und wird anschließend dem Versuchskörper zugeführt. Die Temperatur des Versuchskörpers liegt in allen Versuchen unterhalb des Gefrierpunkts des Wassers.

Der aus der feuchten Luft kondensierende Wasserdampf erstarrt auf dem quer eingebauten Rohr und bildet eine poröse Reifschicht. Das in diesem Wärmeübertragungsprozess erwärmte Kältemittel strömt durch den Kältemittelsammler S zurück zum Kühlmobil und wird durch einen integrierten Kreisprozess gekühlt.

Das Abtauen des Versuchskörpers am Ende des Versuchs wird mit dem im Thermostat TS2 erwärmten Kältemittel realisiert (siehe Abb. 4.1).

Am Austritt der Messstrecke werden die Parameter der Luft (Temperatur und relative Feuchtigkeit) gemessen. Mit einem geringeren Wassergehalt strömt die feuchte Luft zur Auslaufstrecke.

Am Ende der Auslaufstrecke ist der letzte, dritte Feuchtigkeitssensor FS3 eingebaut. An diesem Messpunkt ist die trockene Luft mit Wasserdampf vollständig

¹⁰MINCO HR6673R20.6L12B

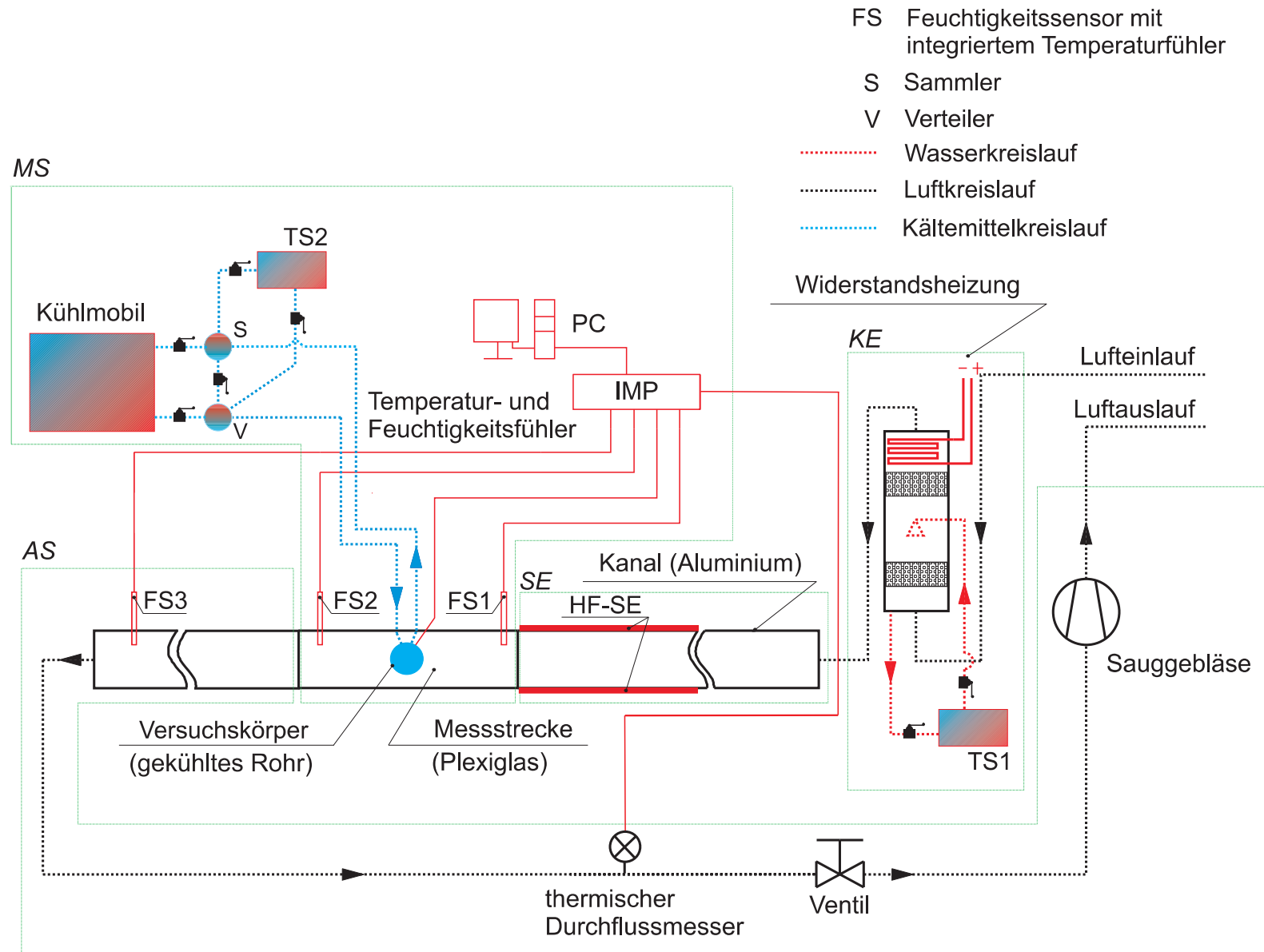


Abbildung 4.1: Schema der Versuchsanlage

4.1 Aufbau des Versuchstands

vermischt und bildet ein homogenes feuchtes Fluid, d.h. die Wasserkonzentration ist an jedem Punkt des Querschnitts im Kanal gleich.

Das Sauggebläse (siehe Tab.4.1) saugt den Luftmassenstrom an, der mit dem thermischen Durchflussmesser gemessen und mit dem Ventil reguliert wird.

Um die Wärmeverluste zu minimieren, sind alle erwärmten Anlagenteile mit Armaflex - Platten ($\lambda \approx 0.03 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) isoliert.

Die Versuchsanlage ermöglicht die Durchführung von Versuchen mit feuchter Luft oberhalb der Umgebungstemperatur im Laborraum.

Tabelle 4.1: Technische Parameter von ausgewählten Bestandteilen der Versuchsanlage

Bestandteil	Beschreibung
Kühlmobil	van der Heijden Typ 534-Antriebsleistung 6.25 kW Nennleistung bei +20 °C 14.5 kW
Sauggebläse	Radialgebläse Typ KRU 15-125-30H1 Volumenstrom 0.25 m ³ s ⁻¹ bei 0.091 bar Druckverlust

4.1.1 Luftkonditionierungseinheit

Die feuchte Luft sollte während der einstündigen Versuchsdauer möglichst konstante Parameter haben. Diese Parameter werden in der Luftkonditionierungseinheit eingestellt. Die Umgebungsluft wird mittels des Sauggebläses zur Rieselkolonne RK angesaugt und erreicht durch Befeuchtung und Erwärmung die angeforderten Parameter. Der Querschnitt der Rieselkolonne ist in Abbildung 4.2 gezeigt und stellt im Prinzip einen Gegenstrom - Wärme- und Stoffübertrager dar. Die Rieselkolonne besteht aus einem Rohr mit eingebauten Füllkörperschichten FK1 und FK2 (siehe Tab. 4.2) sowie eine Wassereinspritzdüse D. Oberhalb der Rieselkolonne befindet sich die Widerstandsheizung WH (siehe Tab. 4.2). Das Wasser aus dem Thermostat TS1 wird im sekundären Kreislauf durch die Düse D auf die erste Füllkörperschicht FK1 eingespritzt. Die Füllkörperschüttung vergrößert die aktive Fläche der Wärme- und Stoffübertragung zwischen der befeuchteten Luft und dem Wasser. Im Idealfall erreicht die Luft die Kühlgrenztemperatur des Wassers und wird übersättigt.

Die Tropfenseparation befindet sich in der zweiten Füllkörperschicht FK2 und die feuchte Luft erreicht am Austritt einen Sättigungszustand. Um die Wahrscheinlichkeit einer Kondensation des Wasserdampfs der feuchten Luft in der Strömungsaufbereitungssektion zu verhindern, wird die Luft zusätzlich mit der Widerstand-

4.1 Aufbau des Versuchstands

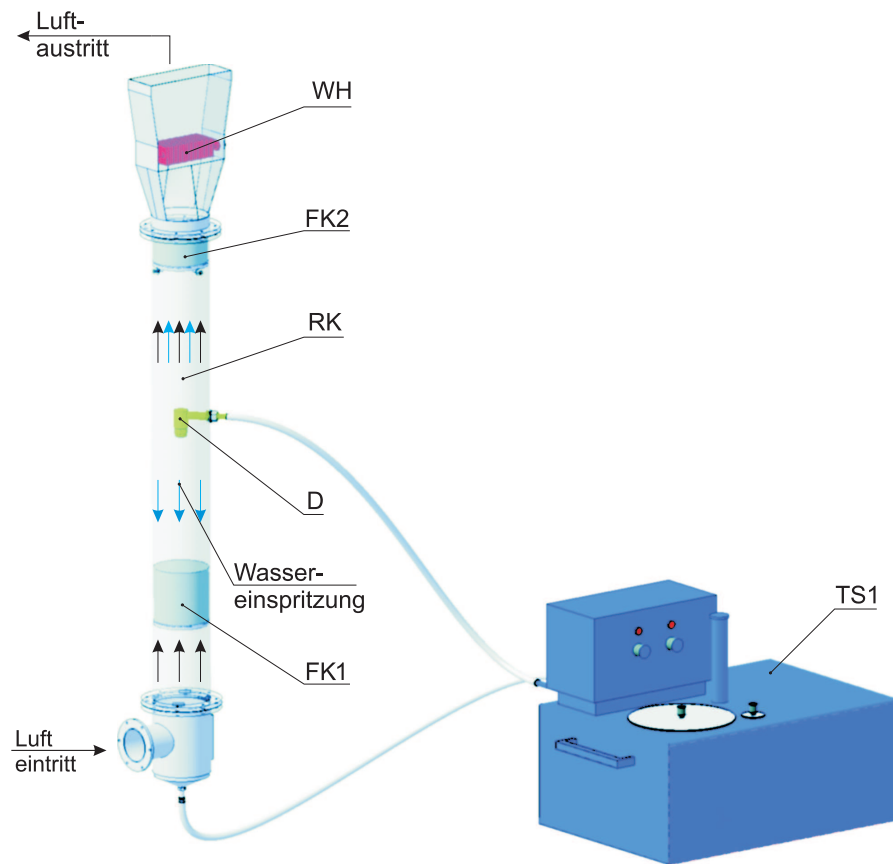


Abbildung 4.2: Luftkonditionierungseinheit (WH - Widerstandsheizung, FK2 - Füllkörperschicht 2, RK - Rieselkolonne, D - Düse, FK1 - Füllkörperschicht 1, TS1 - Thermostat)

Tabelle 4.2: Technische Parameter von ausgewählten Bestandteilen der Luftkonditionierungssektion

Bestandteil	Beschreibung
Füllkörperschicht (FK)	Typ Interpack Größe 2 ($15 \times 11 \text{ mm}$) Edelstahl (1.4301), Fa. Vereinigte Füllkörper Fabriken
Widerstandsheizung (WH)	Rippenrohrheizkörper Typ A-R8-02 Fa. Keller, Ihne & Tesch

4.1 Aufbau des Versuchstands

heizung WH erwärmt und erreicht danach einen ungesättigten Zustand. Der Wassergehalt der feuchten Luft wird über die Temperatur des im sekundären Kreislauf strömenden Wassers in dem Thermostat TS1 reguliert.

4.1.2 Messstrecke

Die in Abbildung 4.3 dargestellte 0.5 Meter lange Messstrecke ist aus transparentem Plexiglas (Fa. Röhm) gefertigt.

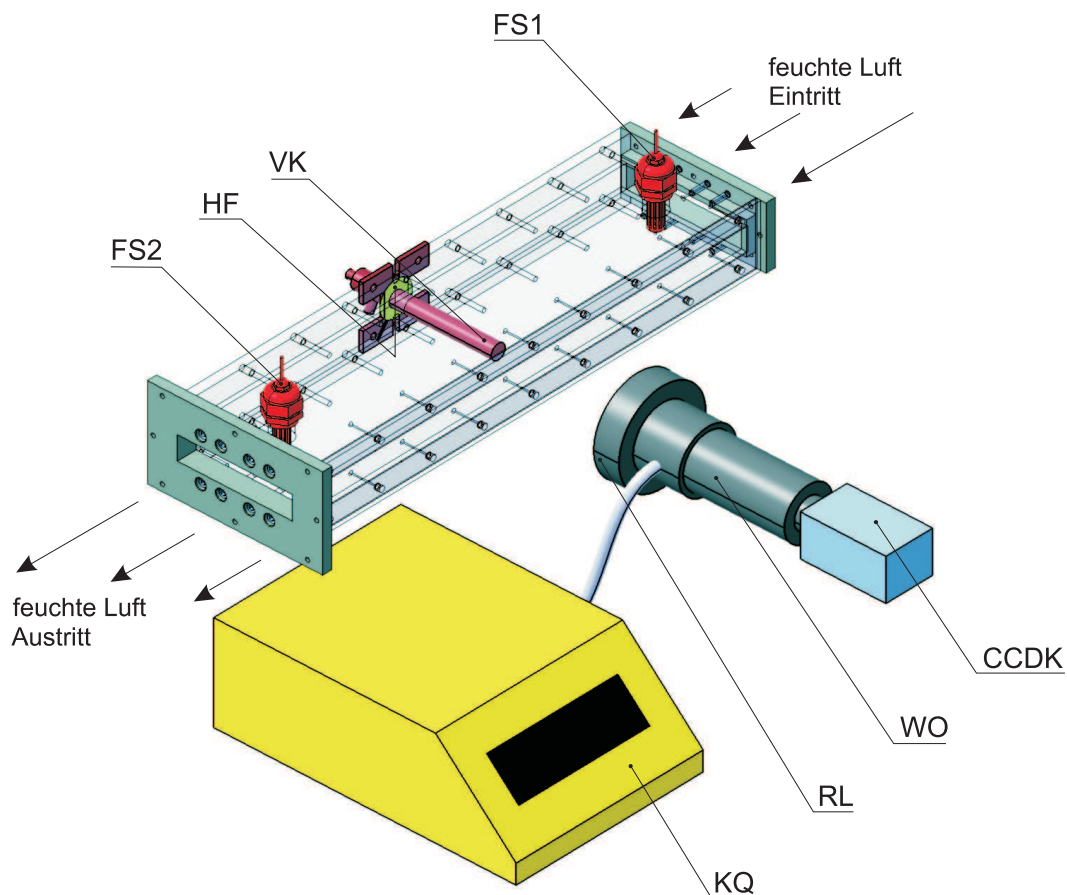


Abbildung 4.3: Messstrecke (FS1 - Feuchtigkeitssensor 1, VK - Versuchskörper, HF - Ringheizfolie, FS2 - Feuchtigkeitssensor 2, KQ - Kaltlichtquelle, RL - Ringlicht, WO - Weitwinkelobjektiv, CCDK - CCD – Kamera)

Die Seitenwände sind mit den oberen und unteren Wänden verschraubt und zusätzlich mit Silikon O-Ringen abgedichtet. Die Geometrie des Kanals beträgt für den definierten Standardversuch (siehe Kapitel 3) 114.0 mm (Breite) \times 24.0 mm (Höhe). Für die anderen Versuche, in denen die Kanalhöhe variiert wurde, sind andere Kanäle mit den Kanalhöhen 34.0 mm und 44.0 mm verwendet worden. In der Messstrecke sind der Versuchskörper VK und zwei Feuchtigkeitssensoren

4.1 Aufbau des Versuchstands

(FS1 und FS2) eingebaut. Unter Verwendung der Feuchtigkeitssensoren mit integrierten Temperaturfühlern werden die Luftparameter (relative Feuchtigkeit und Temperatur) am Eintritt und am Austritt der Messsektion gemessen.

Die Messstrecke ist mit einer schwarzen nicht transparenten selbstklebenden Folie beklebt. Die schwarze Beklebung minimiert durch Absorption die Reflexion der Lichtstrahlung der Kaltlichtquelle auf der polierten Rohroberfläche. Das entstehende Reifprofil wird mit Hilfe einer CCD - Kamera durch ein kleines transparentes Fenster auf der Vorderseite des Kanals fotografiert.

4.1.3 Konstruktion des Versuchskörpers

Die experimentellen Untersuchungen der Reifbildung wurden auf gekühlten, äußeren Rohroberflächen mit verschiedenen Rauigkeiten und Strukturen (siehe Tabelle 3.1) durchgeführt. Das Rohr ist im Querschnitt in Abbildung 4.4 dargestellt.

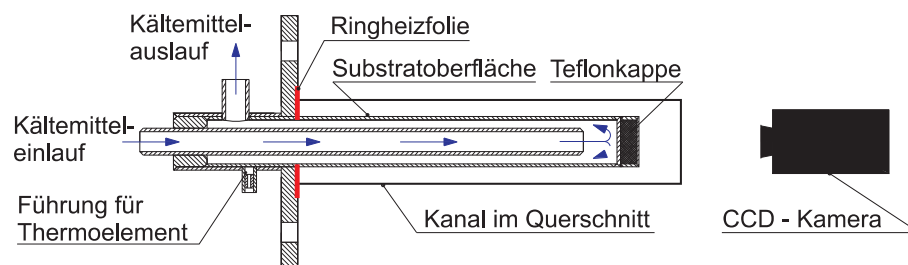


Abbildung 4.4: Eingebauter Versuchskörper im Kanal

Der Versuchskörper mit dem Standarddurchmesser von 15.0 mm und effektiv gekühlter Länge im Kanal von 85.0 mm ist aus Kupfer¹¹ gefertigt. Der Ein- und Auslauf des Kältemittels befindet sich an der gleichen Seite des Rohres. Das temperierte Kältemittel strömt aus dem Kühlmobil zum inneren Rohr des Versuchskörpers ein und wird durch den freien Raum zwischen dem äußeren und inneren Rohr mit höherer Temperatur abgeführt. Diese technische Lösung minimiert den longitudinalen Temperaturgradient ($\Delta T_w < 0.15\text{ K}$) auf der äußeren Oberfläche des gekühlten Rohres. Darüber hinaus ermöglicht dies die Verwendung einer optischen berührungsfreien Methode für die Beobachtung des Reifschichtwachstums. Die CCD-Kamera ist axial zum Versuchskörper installiert.

¹¹(EN 1057:1996-05) - DIN 1786

Am Stirnende des gekühlten Rohres ist eine Teflonkappe in der Kupfertülle mit sehr dünner Wandstärke ($\delta = 0.5 \text{ mm}$) eingebaut, um die Randeffekte der Reifbildung bei der Umströmung der feuchten Luft zu minimieren.

Die Kondensation und spätere Erstarrung der Wassertropfen auf der Seitenwand in der Nähe des eingebauten Rohres führt zu einem Messfehler in der Reifmasse. Daher wurde zwischen der Kupferrippe und der Seitenwand eine Ringheizfolie¹² installiert, um dort die Wandtemperatur oberhalb der Luftsättigungstemperatur zu halten und den Kondensationsprozess des Wasserdampfes zu verhindern.

Das Thermoelement dient zur Messung der Temperatur der Substratoberfläche des äußeren Rohres am Austritt aus dem Versuchskörper. Die mittlere Temperaturabnahme entlang des Rohres zwischen dem Temperaturmesspunkt und der effektiv gekühlten, im Kanal eingebauten Rohrlänge ist bei der Einstellung der Kältemitteltemperatur am Einlauf zum Versuchskörper berücksichtigt.

4.2 Messwerterfassung

In einem einstündigen Versuch werden alle physikalischen Messgrößen kontinuierlich gemessen und in 30-sekündigen Abständen auf einem Mess-PC zur weiteren Bearbeitung gespeichert. Die analogen Signale des Messwertgebers werden im Analog-Digital-Wandler, in der Abbildung 4.1 als IMP bezeichnet, erfasst und über eine Adapterkarte¹³ dem Mess-PC übermittelt.

Der IMP-Wandler verfügt über 20 separate Kanäle für die entsprechenden Signale der Messgeräte. Die Kanäle besitzen eine Auflösung von $20 \mu\text{V}$.

Die Visualisierung und Abspeicherung der Messdateien erfolgt mit dem Programm IMP-View. Zur weiteren Bearbeitung der gespeicherten Messgrößen wird die Software Matlab mit entsprechend programmierten Prozeduren verwendet.

4.2.1 Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung der feuchten Luft, der Substratoberfläche und des Wassers im Thermostat werden verschiedene Temperatursensoren verwendet.

Die Lufttemperatur wird mit Feuchte- und Temperaturmesswertgebern¹⁴ am Einlauf der Messstrecke und am Auslauf der Mess- und Auslaufstrecke gemessen.

Die integrierten und eingebauten Widerstandstemperaturfühler Pt100 PRT DIN

¹²MINCO HR5542R25.5L12A

¹³Typ 35954A der Firma Schlumberger

¹⁴Vaisala HUMICAP HMT330 [1]

IEC 751 class 1/4 haben nach der Werkskalibrierung¹⁵ eine Messunsicherheit von $\pm 0.1\text{ K}$. Die Temperatur der Substratoberfläche und des Wassers im Thermostat wird mittels eines Standard- Thermoelements vom Typ K (NiCr–Ni)¹⁶ der Firma T.M.H. GmbH gemessen.

Es lässt sich lediglich die Temperaturendifferenz zwischen den Enden der Stoffpaarungen des Thermoelements messen. Das eine Ende des Thermoelements ist im IMP-Wandler angeschlossen, das andere als Vergleichsstelle befindet sich in einem Dewar-Gefäß. Als Referenztemperatur dient $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das Dewar-Gefäß ist mit schmelzendem Eis und entionisiertem Wasser gefüllt. Die Gleichgewichtstemperatur des Eis-Wasser-Gemisches wird mit einer Genauigkeit von $\pm 0.02\text{ K}$ ¹⁷ gemessen und für die Dauer des Experiments konstant gehalten.

Die K-Thermoelemente weisen eine geringe Thermospannung von $40\text{ }\mu\text{V}$ pro 1 K auf. Daraus folgt die kleinste erkennbare Temperaturdifferenz von 0.025 K , die kleiner als die Abweichung der Temperaturmessung ($\pm 0.1\text{ K}$) ist.

Um den Messfehler zu minimieren, sollten die Thermoelemente kalibriert werden. Nach der Kalibrierung¹⁸ der neuen Thermoelemente lässt sich feststellen, dass der absolute Temperaturfehler zwischen dem kalibrierten K-Thermoelement und dem Musterthermoelement Pt100 sehr gering ist ($\Delta T \leq 0.07\text{ K}$). Wegen des geringen Temperaturmessfehlers wurden keine Kalibrierungskurven für die Minimierung der Temperaturfehler berücksichtigt.

4.2.2 Feuchtigkeitsmessung

Für die Feuchtigkeitsmessungen wurden drei kapazitive Feuchte- und Temperaturmesswertgeber (FS1, FS2 und FS3) installiert.

Bei kapazitiven Feuchtigkeitssensoren ist auf einem Glassubstrat eine feuchteempfindliche Polymerschicht zwischen zwei Metallelektroden aufgebracht. Mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit ändern sich die Dielektrizitätskonstante und damit die Kapazität des Dünnschichtkondensators. Das Messsignal ist proportional zur relativen Feuchte und unabhängig von dem Umgebungsdruck.

Die Messstellen sind in Abbildung 4.1 gezeigt und im Kapitel 4.1 beschrieben.

Die Feuchtigkeitssensoren erlauben nach der Werkskalibrierung die Messung der relativen Feuchtigkeit der Luft in Bereichen von $0\ldots 40\%\text{ rF}$ und von $40\ldots 97\%\text{ rF}$ mit einer Messunsicherheit von $\pm 0.6\%\text{ rF}$ beziehungsweise $\pm 1.0\%\text{ rF}$.

¹⁵Referenztemperatur $+22.08\text{ }^{\circ}\text{C}$

¹⁶DIN IEC 584 (EN 60584) Klasse 1, 0.5 mm

¹⁷gemessen mit Nullpunktthermometer

¹⁸durchgeführt im Rahmen der Studienarbeit von Urner[83]

4.2 Messwerterfassung

Eine erste Fehleranalyse der ausgerechneten Größen (z. B. der Masse des Kondensates, des Gesamtwärmestroms und der mittleren Reifdichte) zeigte, dass die Messunsicherheit der Feuchtigkeitssensoren zu groß ist. Um die Standardabweichung zu minimieren, wurden diese Sensoren genauer nach DKD-Normen bei der Firma Testo kalibriert. Die Standardabweichungen für die sechs genommenen Messpunkte sind in der Tabelle 4.3 gezeigt.

Tabelle 4.3: Messpunkte für die Kalibrierung nach DKD und ihre Abweichungen

Messpunkte rF%	Abweichung rF%
29.9	± 0.2
39.8	± 0.3
50.0	± 0.3
59.9	± 0.3
70.1	± 0.3
80.0	± 0.4

Die Feuchte- und Temperaturmesswertgeber dienen zur Messung der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit der durchströmten feuchten Luft. Der Wassergehalt lässt sich aus der Gleichung ermitteln

$$x_g = 0.622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_s(t)}{p_G - \varphi \cdot p_s(t)}. \quad (4.1)$$

Jeder Temperatur- und Feuchtigkeitssensor ist vor flüssigem Wasser und mechanischer Zerstörung mit einem Filter geschützt. Die durch den Filter mit geringer Geschwindigkeit strömende feuchte Luft wird in den Mikroporen der Edelstahlkappe gekühlt, was die Genauigkeit der Temperatur- und Feuchtigkeitsmessung beeinflusst. Für den konstanten Wassergehalt x_g steigt die relative Feuchtigkeit mit Abnahme der Lufttemperatur. Um das zu vermeiden, sind die Filter aus den Feuchtigkeitssensoren entfernt worden.

4.2.3 Durchflussmessung

Zur Messung des Massenstroms der durchströmenden feuchten Luft wurde ein thermischer Durchflussmesser¹⁹ genommen. Die Messstelle ist schematisch in Abbildung 4.1 dargestellt.

Das thermische Messprinzip beruht auf der Abkühlung eines beheizten Temperatursensors durch das vorbeiströmende Medium. Im Messgerät umströmt das Medium dazu zwei Pt100 -Temperatursensoren. Der erste Sensor registriert die aktuelle Prozesstemperatur als Referenz. Der zweite Sensor dient auch als Heizelement und wird entsprechend der Abkühlung auf eine exakt definierte Temperaturdifferenz aufgeheizt. Je größer der Massenstrom ist, der über den aufgeheizten Temperatursensor strömt, desto größer ist dessen Abkühlung und desto stärker ist der erforderliche Heizstrom zur Aufrechterhaltung der Temperaturdifferenz. Der gemessene Heizstrom ist somit ein Maß für den Massenstrom.

Der Durchflussmesser ist in der Luftauslaufsektion mit entsprechenden Ein- und Auslaufmindestrohrängen eingebaut.

Die mittlere relative Abweichung des gemessenen Massenstroms im Bereich von 0.01 kg s^{-1} bis 29.95 kg s^{-1} beträgt $\pm 0.73 \%$.

4.2.4 Optische Messmethode zur Bestimmung des Reifvolumens

Für die Bestimmung des Reifprofils bzw. des Reifvolumens wird eine optisch-kontaktfreie Messmethode verwendet. Das Wachstum der porösen Reifschicht auf der gekühlten Rohroberfläche wird unter Verwendung einer monochromen CCD-Kamera in 30-sekündigen Abständen fotografiert.

Um das Reifprofil zu identifizieren, wird ein Makro-Weitwinkel-Zoomobjektiv (WO) verwendet.

Die technischen Parameter der CCD-Kamera und des Makro - Weitwinkel - Zoomobjektives sind in Tabelle 4.4 aufgelistet.

Die auf der Substratoberfläche anwachsende Reifschicht besitzt die gleiche Dicke in dem Längsschnitt des Rohres und wird unter Verwendung der optischen Messmethode (CCD-Kamera) experimentell verifiziert. Dies ermöglicht die Bildaufnahme der von der Vorderseite des gekühlten Rohres entstehenden Reifschicht und die Berechnung ihrer Dicke. Darüber hinaus wird für die gegebene, im Kanal effektiv gekühlte Rohrlänge unter Verwendung der optischen Methode die bestimmte Reif-

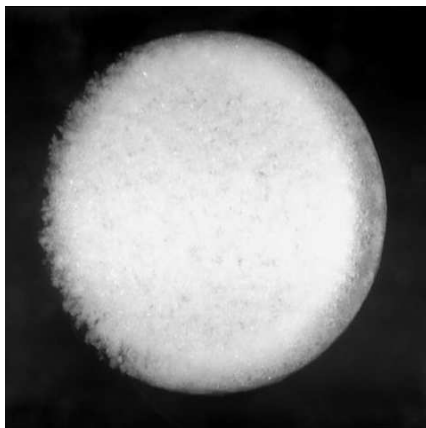
¹⁹Endress+Hauser FL-11427 AT70F-A15C11ACB11

dicke berechnet. Die CCD-Kamera mit dem Weitwinkelobjektiv ist in Verlängerung der Rohrachse installiert. Über eine 12-polige Buchse (zur Übertragung von Video, Sync und Betriebsspannung mit einer Frame-Grabber-Karte DFG/BW1 von The Imaging Source) erfolgt die Rechneranbindung. Für die Beleuchtung des Versuchskörpers wird eine Kaltlichtquelle KQ mit einem Ringlicht RL verwendet (siehe Abb. 4.3).

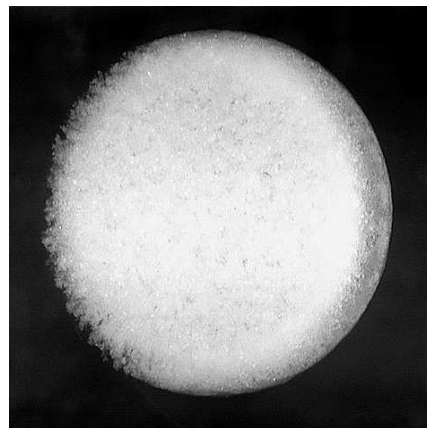
Die Nachbearbeitung der Ausgangsbilder wird im Programm Matlab durchgeführt und ist in den Abbildungen 4.5, 4.6 und 4.7 illustriert.

Als Beispiel ist die Bildbearbeitung an einem Bild mit Reifstruktur für die Standardparameter nach 50 Minuten Versuchsdauer dargestellt. Die feuchte Luft umströmt das Rohr von der rechten zur linken Seite.

Im ersten Schritt wird unter Verwendung von Standardprozeduren der Image Processing Toolbox in Matlab die Ausgangsbildschärfe verbessert (Abb. 4.5).



(a) Ausgangsbild

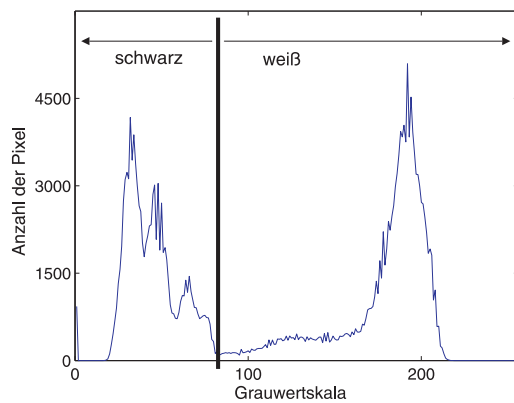


(b) Überarbeitetes Bild mit verbesserter Schärfe

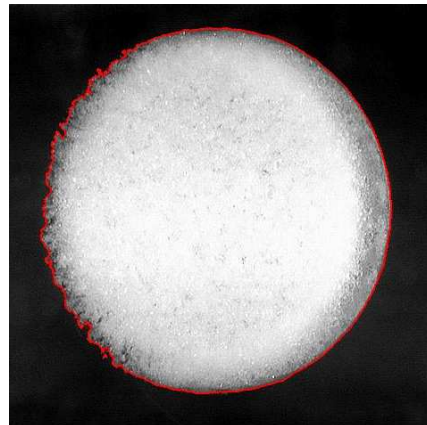
Abbildung 4.5: Ausgangsbild und überarbeitetes Bild mit verbesserter Schärfe

Im nächsten Schritt wird die Reifkontur auf dem Rohr rekonstruiert. Die Bildmatrix mit Graustufenwerten 0-256 wird auf den Bereich zwischen 0 und 1 normiert und die Reifkontur gekennzeichnet. Unter Verwendung eigener Rechenprozeduren wird eine Häufigkeitsverteilung der Graustufen zwischen 0 und 256 erstellt.

4.2 Messwerterfassung



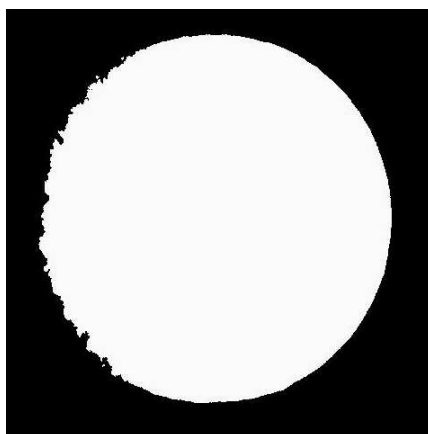
(a) Grauwertskala als Funktion der Pixelanzahl



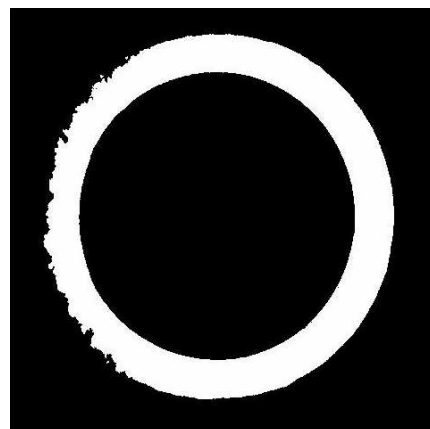
(b) Überarbeitetes Bild mit definierter Kontur

Abbildung 4.6: Histogramm und überarbeitetes Bild mit identifiziertem Reifprofil

Anhand dieser lässt sich ein Grenzwert definieren, der den Übergang zwischen Reif und Hintergrund beschreibt. Mit Hilfe dieses Grenzwertes lässt sich die Reifkontur eindeutig rekonstruieren.



(a) Schwarz-weiß überarbeitetes Bild



(b) Schwarz-weiß überarbeitetes Bild der Reifschicht

Abbildung 4.7: Schwarz-weiß Bilder

Abbildung 4.7 stellt das Schwarz-weiß Bild mit dem abgezogenen Durchmesser des Rohres, d.h. die entstehende poröse Reifschicht dar.

Tabelle 4.4: Technische Parameter der optischen Messgeräte

Bestandteil	Beschreibung
CCD-Kamera (CCDK)	DMK 3H12K von The Imaging Source 1/2" Bildsensor effektive Auflösung 752 (H) \times 582 (V) Pixelgröße 8.6 μm (H) \times 8.3 μm (V)
Makro-Weitwinkel-Zoomobjektiv (WO)	F2.5/18-108 mm mit Brennweite (f)= 18-108 mm Blende (F) = F2.5, Anschlussgewinde (C) Nennformat 2/3", Zoombereich 6-fach horizontaler Bildwinkel bei Nennformat 34°-6° Schärfebereich 10-30 cm – mit Vorsatzlinse 20 cm - ∞ – ohne Vorsatzlinse
Kaltlichtquelle (KQ)	KL2500 LCD, Fa. Schott

4.2.5 Fehleranalyse von direkt gemessenen physikalischen Größen

Um die Reproduzierbarkeit der direkt gemessenen physikalischen Größen (Temperatur, relative Feuchte, Massenstrom) zu prüfen und die mittlere Standardabweichung zu minimieren, wird jede Versuchsserie der experimentellen Versuche zwischen 3 bis 5 mal wiederholt. Die gemessenen und gespeicherten Messwerte X_i jeder Messserie j werden gemittelt

$$\overline{X}_j = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N X_{ij} \quad (4.2)$$

und die mittlere Standardabweichung berechnet

$$\delta \bar{X}_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{N \cdot (N - 1)}}. \quad (4.3)$$

Die mittlere Standardabweichung²⁰ nimmt mit steigender Versuchsanzahl jeder Serie ab. Für eine kleine Anzahl der Messwerte jeder Versuchsserie wird die mittlere Standardabweichung um den Parameter ε der Studentschen t-Verteilung für ein bestimmtes Konfidenzintervall vergrößert

$$\delta \bar{X}_{j\varepsilon} = \varepsilon \cdot \delta \bar{X}_j. \quad (4.4)$$

Am Eintritt der Messtrecke werden die Parameter der feuchten Luft, die Temperatur und die relative Feuchtigkeit gemessen. Die Parameter sind einstellbar und können konstant gehalten werden. Die Reproduzierbarkeit der gemessenen Größen ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Es ist festzustellen, dass die maximale Abweichung von den Mittelwerten sehr gering ist und für die Temperatur $\pm 0.8 \text{ K}$ und für die relative Feuchtigkeit $\pm 0.16 \%rF$ beträgt.

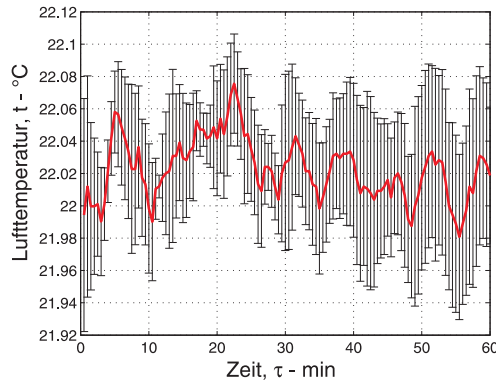
Im Vergleich zu den regulierbaren Parametern am Eintritt zur Messtrecke sind die Temperatur und relative Feuchte am Austritt aus der Mess- und Auslaufstrecke nicht konstant, sie ändern sich im Verlauf des Experiments und zusätzlich in jedem Versuch derselben Serie.

Das lässt sich damit erklären, dass die Lufttemperatur am Austritt aus der Messtrecke von der Temperatur der Kanalwände abhängt, welche mit zunehmender Dauer des Experiments steigt. Für den konstanten Wassergehalt x nimmt bei steigender Temperatur die relative Feuchte ab. Um den Temperatureinfluss des Kanals der Luftauslaufsektion auf die durchströmende Luft zu minimieren, wurde diese Kanalstrecke aus Plexiglas gefertigt (siehe Kapitel 4.1).

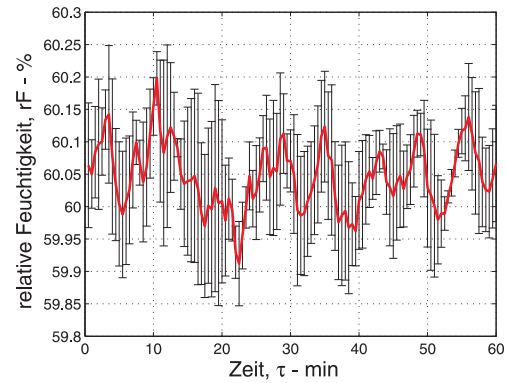
Der Prozess der Reifbildung auf der gekühlten Rohroberfläche ist instationär. Mit Dauer des Experiments nimmt die Masse des kondensierenden Dampfes zu und erreicht danach ihren Maximalwert. Von diesem Zeitpunkt wird der Prozess sta-

²⁰Gauß'sches Fehlerfortpflanzungsgesetz

4.3 Indirekt bestimmte physikalische Größen



(a) Mittelwert der Lufttemperatur mit den Standardabweichungen



(b) Mittelwert der relativen Feuchtigkeit mit den Standardabweichungen

Abbildung 4.8: Verlauf der Lufttemperatur und der relativen Feuchtigkeit

tionär, was makroskopisch einem thermodynamischen Gleichgewichtszustand²¹ entspricht.

4.3 Indirekt bestimmte physikalische Größen

Zu den indirekt bestimmten physikalischen Größen gehören die Masse sowie der Massenstrom des Kondensates, der Gesamtwärmestrom, das Reifvolumen, die mittlere Reifdichte und die Reifwachstumsgeschwindigkeit. Diese indirekt bestimmten physikalischen Größen werden im nächsten Kapitel qualitativ und quantitativ beschrieben sowie graphisch dargestellt. Darüber hinaus werden die wichtigsten Reifparameter (Masse des Kondensates und mittlere Reifdichte) korreliert.

4.3.1 Masse und Massenstrom des Kondensates

Die Masse M_K und der Massenstrom des Kondensates \dot{M}_K wird aus der Wasserbilanz für den Bilanzraum der Messstrecke MS und des Kanals der Luftauslaufsektion AS berechnet:

$$\dot{M}_K = \dot{M}_{fL} \cdot \frac{x_{g1} - x_{g3}}{1 + x_{g3}}. \quad (4.5)$$

²¹Als Summe des thermischen, mechanischen und chemischen Gleichgewichts

4.3 Indirekt bestimmte physikalische Größen

Die Parameter der feuchten Luft, die Temperatur und die relative Feuchtigkeit werden mit den Feuchtigkeitssensoren FS1 und FS3 gemessen.

Wie schon in Kapitel 4.1 erklärt, bildet die feuchte Luft am Ende der Luftauslaufsektion *AS* ein homogenes Gemisch aus trockener Luft und Wasserdampf. Der konstante Wassergehalt in jedem Punkt des Kanalquerschnitts wird mit dem Feuchtigkeitssensor FS3 gemessen. Dies ermöglicht die genaue Berechnung der Masse und des Massenstroms des kondensierten Dampfes, die der Reifmasse bzw. dem Reifmassenstrom entsprechen.

4.3.2 Gesamter Wärmestrom

Der übertragene Gesamtwärmestrom \dot{Q}_G besteht aus zwei Bestandteilen, dem latenten \dot{Q}_{lat} und dem fühlbaren $\dot{Q}_{f\ddot{u}hl}$ Wärmestrom

$$\dot{Q}_G = \dot{Q}_{f\ddot{u}hl} + \dot{Q}_{lat}. \quad (4.6)$$

Der konvektiv an die Reifschicht abgegebene fühlbare Wärmestrom kann unter der vereinfachenden Annahme konstanter Reifoberflächentemperatur von $0^\circ C$ aus der Gleichung

$$\dot{Q}_{f\ddot{u}hl} = \dot{M}_{tr.L} \cdot [c_{p\ tr.L} \cdot (t_1 - t_2) + c_{p\ D} \cdot (x_1 \cdot t_1 - x_2 \cdot t_2)] \quad (4.7)$$

ermittelt werden.

Der latente übertragene Wärmestrom, als Produkt der Desublimationswärme und Massenstrom des Kondensates, lässt sich mit Gleichung berechnen

$$\dot{Q}_{lat} = \dot{M}_K \cdot r_{lat}. \quad (4.8)$$

Die latente Wärme r_{lat} berücksichtigt zwei Phasenwechsel, die Kondensation bei Umgebungsdruck und die von der Eistemperatur²² abhängige Erstarrung. Die Ab-

²²Hyland und Wexler[32]

4.3 Indirekt bestimmte physikalische Größen

hängigkeit der latenten Erstarrungswärme von der Eistemperatur ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

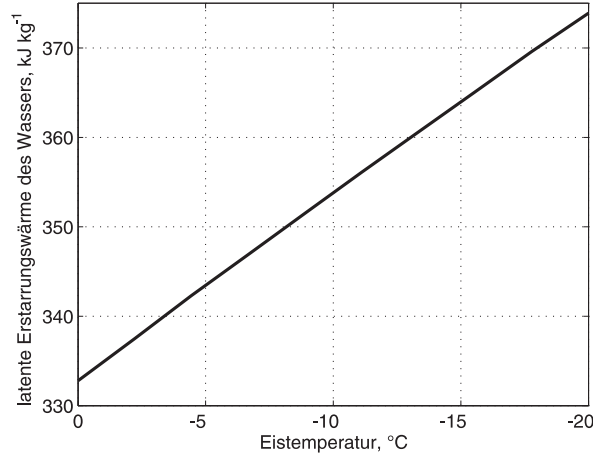


Abbildung 4.9: Latente Erstarrungswärme

Der Versuchskörper ist symmetrisch in der Mitte der Messstrecke zwischen den Feuchte- und Temperaturmesswertgebern eingebaut. Darüber hinaus ist die Messstrecke mit Armaflex[®] isoliert, um den Einfluss der freien Konvektion der umgebenden Luft auf den im Kanal durchströmenden Luftmassenstrom zu reduzieren.

4.3.3 Volumen des Reifes

Die Ermittlung des Reifvolumens ermöglicht die Berechnung der mittleren Reifdichte. Die Methoden für die Bestimmung des Reifprofils und -volumens sind in Kapitel 4.2.4 beschrieben. Die Reifschichtfläche wird als Produkt der Anzahl der weißen Pixel N_{Pw} , welche die Reifschicht identifizieren, und der Pixelgröße A_p , vermindert um die Fläche der Vorderseite des gekühlten Rohres berechnet. Für die gegebene, im Kanal eingebaute effektiv gekühlte Rohrlänge l_r wird das Reifvolumen als Produkt der Rohrlänge und Reifschichtfläche berechnet:

$$V_R = \left(\sum_{i=1}^n N_{Pw} \cdot A_p - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot l_r. \quad (4.9)$$

Die dazu benötigten Rechenvorschriften für die Bildnachbearbeitung wurden mit dem Programm Matlab[®] programmiert.

Das Reifvolumen lässt sich nur unter Verwendung der Gl. (4.9) berechnen, wenn

4.3 Indirekt bestimmte physikalische Größen

die Reifschicht eine zylindrische Geometrie bildet, also in jedem Punkt des Längsschnitts die gleiche Dicke aufweist. Dieses Phänomen des regulären und gleichen Reifdickewachstums im Längsschnitt wurde am Anfang der Versuche experimentell bestätigt, so dass diese Gleichung für die Berechnung des Reifvolumens verwendet werden kann.

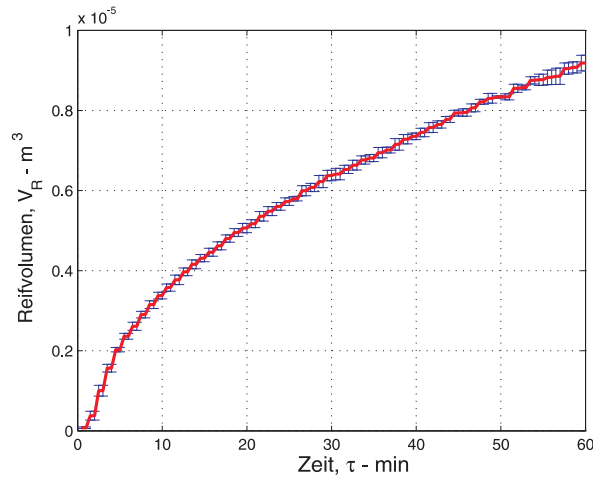


Abbildung 4.10: Die Reproduzierbarkeit der Reifvolumenzuwachsmessung

Für die Versuchsserien wurde lediglich die Reproduzierbarkeit des Reifvolumenzuwachses (Abb. 4.10) ermittelt, welche für die Standardparameter eine geringere Abweichung als 4% aufweist.

4.3.4 Mittlere Reifdichte

Die mittlere Reifdichte ist als die zentrale Größe in den experimentellen Versuchen der Reifbildung definiert worden. Die Ermittlung dieses Parameters ermöglicht die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der porösen, im instationären Prozess entstehenden Reifstruktur.

Die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Reifdichte ist in Kapitel 2.3.3 beschrieben.

Die lokale Reifdichte ρ_R , gemäß der Gleichung

$$\rho_R(P) = \lim_{\Delta V_R \rightarrow 0} \frac{\Delta M_K}{\Delta V_R} = \frac{dM_K}{dV_R} \quad (4.10)$$

4.3 Indirekt bestimmte physikalische Größen

kann für einen bestimmten gegebenen Punkt P berechnet werden. Die Berücksichtigung der lokalen Änderungen der Reifdichte, die durch den „melt-back“ Effekt verursacht werden, hat in den industriellen Anwendungen keine Bedeutung. Darüber hinaus ist die lokale Reifdichte nicht repräsentativ für die gesamte Reifschicht, welche durch eine mittlere Reifdichte charakterisiert ist. Für praktische Anwendungen ist die mittlere Reifdichte

$$\bar{\rho}_R = \frac{M_K}{V_R}, \quad (4.11)$$

die aus der Masse des Kondensates und dem Reifvolumen ermittelt wird von Bedeutung.

4.3.5 Reifwachstumsgeschwindigkeit

Die Reifwachstumsgeschwindigkeit \dot{V}_R ergibt sich aus der Volumenänderung pro Zeit,

$$\dot{V}_R = \frac{\Delta V_R}{\Delta \tau}. \quad (4.12)$$

Mit diesem Parameter lässt sich die Geschwindigkeit des Reifwachstums während der Versuchsdauer berechnen und graphisch darstellen.

Die mittlere Abweichung entspricht der Reproduzierbarkeit der Reifvolumenmessung.

4.3.6 Fehleranalyse von indirekt ausgerechneten physikalischen Größen

Alle indirekt bestimmten physikalischen Größen (Masse und Massenstrom des Kondensates, Gesamtwärmestrom, Reifvolumen, Reifwachstumsgeschwindigkeit, mittlere Reifdichte), welche von direkt gemessenen Größen abhängen ($F_j = F_j(X_j)$), werden gemittelt (siehe Kapitel 4.2.5). Gemäß dem Fehlerfortpflanzungsgesetz wird die mittlere Standardabweichung berechnet:

4.3 Indirekt bestimmte physikalische Größen

$$\bar{\sigma}_j = \sqrt{\sum_{j=1}^N \left[\frac{\partial F_j}{\partial \bar{X}_j} \cdot \delta \bar{X}_j \right]^2}. \quad (4.13)$$

Diese Formel lässt sich nur verwenden, wenn die zufälligen Fehler $\delta \bar{X}_j$ größer als die systematischen Fehler ΔX sind. Im anderen Fall, wenn die systematischen Fehler ΔX größer als die zufälligen Fehler $\delta \bar{X}_j$ sind, lässt sich die mittlere Standardabweichung aus dem totalen Differential berechnen

$$\bar{\sigma}_j = \sum_{j=1}^N \left[\left| \frac{\partial F_j}{\partial \bar{X}_j} \right| \cdot \Delta X_j \right]. \quad (4.14)$$

Die beispielhaften Berechnungen des Wassergehalts zeigen, dass ihre mittlere Standardabweichung von der Messgenauigkeit der direkt gemessenen Parameter; der Temperatur und der relativen Feuchtigkeit, abhängig ist. Der mittlere Wert des Wassergehalts mit mittlerer Standardabweichung wurde im Messpunkt FS1 für die einstellbaren Luftparameter bestimmt. Während der Dauer des Experiments sind diese Parameter kontrolliert, so dass ihre Abweichung minimiert ist.

Die aus der Messstrecke austretende feuchte Luft besitzt nicht regulierbare und nicht konstante Parameter in jeder Versuchserie. Der von der durchströmenden feuchten Luft übertragene konvektive Wärmestrom erwärmt die Wände der Auslaufstrecke des Kanals. Die mittleren Temperaturen am Austritt aus der Messstrecke, gemessen im Messpunkt FS2 oder FS3, haben unterschiedliche Mittelwerte für alle Versuchsserien, trotz gleichen konstanten Wassergehalts.

Der Wassergehalt x_g hängt von drei Parametern; Lufttemperatur t_{fL} , relative Feuchte φ und Gesamtdruck p_G ab. Daraus folgt, dass der gleiche Wert des Wassergehalts für verschiedene Lufttemperaturen und relative Feuchtigkeiten erreicht werden kann. Diese Abhängigkeit erhöht die mittlere Standardabweichung des Wassergehaltes, beeinflusst also die Masse und den Massenstrom des Kondensates, den Gesamtwärmestrom und die mittlere Reifdichte.

Für die weiteren Berechnungen wird an den Messpunkten FS2 und FS3 die Genauigkeit der Feuchte- und Temperaturmesswertgebern ΔX_j angenommen.

In der Tabelle 4.5 sind die Fehler der indirekt gemessenen Größen für die variablen relativen Feuchtigkeiten im Bereich von 30% bis 80% aufgezeigt. Die Messunge-

4.3 Indirekt bestimmte physikalische Größen

naugigkeiten sind mit dem mittleren prozentualen Fehler E ausgedrückt.

$$E = \frac{\overline{\sigma_j}}{\overline{F_j}} \cdot 100\% \quad (4.15)$$

steigen mit abnehmendem Wert der relativen Feuchtigkeit.

Tabelle 4.5: Prozentualer Fehler von indirekt gemessenen physikalischen Größen

$rF\%$	30%	40%	50%	60%	70%	80%
prozentueller Fehler, E - %						
\dot{M}_K	20.6%	21.5%	18%	16%	14.4%	17.4%
\dot{Q}_G	20.9%	21.7%	18.2%	16.7%	15.8%	18.4%
$\bar{\rho}_R$	24.3%	21.6%	18.1%	16.3%	14.6%	17.8%

Diese Abweichungen sind repräsentativ für alle anderen Parameter. Die maximalen und minimalen Unsicherheiten für die Parameterstudie sind in Tabelle 4.5 dargestellt. Die prozentuellen Unsicherheiten der anderen variierenden Parameter (siehe Tabelle 3.1) liegen ebenfalls innerhalb dieser Grenzen.

Kapitel 5

Versuchsdurchführung und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Versuchsergebnisse präsentiert und eingehend besprochen. Zu Beginn wird der Einfluss der Standardparameter auf die wichtigsten Reifeigenschaften präsentiert: die Masse und der Massenstrom des ausfallenden Wassers, d.h. die Masse und der Massenstrom des Reifes, der Gesamtwärmestrom, das Reifvolumen, die Reifwachstumsgeschwindigkeit und die mittlere Reifdichte. Im Weiteren werden die Einflüsse der variierenden Luftparameter, d.h. der relativen Feuchtigkeit, der Luftgeschwindigkeit und der Lufttemperatur gezeigt und analysiert.

Danach werden die Ergebnisse der variierenden Substratoberflächenparameter, d.h. ihre Temperatur, Struktur und Rauigkeit dargestellt.

Schließlich werden die Geometrie des Kanals und des Versuchskörpers variiert und deren Einfluss diskutiert.

5.1 Vorbereitung der Substratoberfläche

Die im Experiment verwendete Substratoberfläche C1 des Versuchskörpers wird vor jeder Versuchsserie entfettet²³ und mit Ethanol gereinigt. Die Rauheit R_a des Rohres C1 wurde am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt gemessen und beträgt $R_a = 0.04$ (siehe Tabelle 3.1).

Die Reinigung der Kupfersubstratoberfläche mit Ethanol, gemäß der chemischen Reaktion

²³Paste Ambassador der Firma Ambadorchemie



führt zur Reduktion des Kupferoxids CuO zu Kupfer Cu und zur Oxidation des Ethanols CH_3CH_2OH zu Acetaldehyd CH_3CHO .

Der Einfluss der Langzeitwirkung des Oxidationsprozesses (siehe Abbildung 2.19) beeinflusst stark die Wärme- und Stoffübertragung in der zuwachsenden porösen Reifstruktur.

5.2 Standardparameter

Massenstrom des Kondensates

Der zeitliche Verlauf des Massenstroms des ausfallenden Wassers für definierte Standardparameter ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die genaue Analyse des zeitlichen Verlaufs ermöglicht eine qualitative und quantitative Beschreibung der wichtigsten Phasen während der Reifbildung.

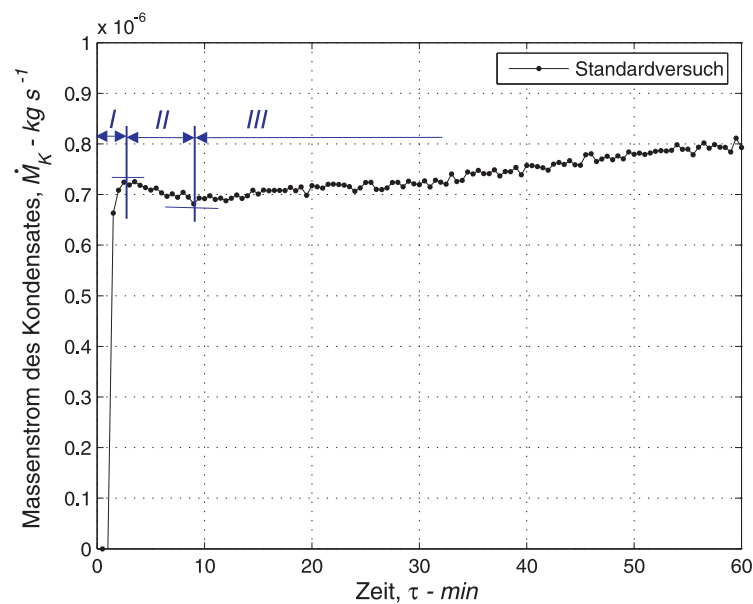


Abbildung 5.1: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für Standardparameter

Der Massenstromverlauf kann in drei charakteristische zeitliche Phasen eingeteilt werden.

5.2 Standardparameter

Es ist zu beobachten, dass der Massenstrom des Kondensates zu Versuchsbeginn steigt und ein erstes Maximum erreicht. Danach nimmt der Massenstrom ab, erreicht ein Minimum, steigt wieder an und erreicht schließlich einen Maximalwert. Diese Zeitintervalle werden im Folgenden detailliert besprochen.

In der ersten Phase des Experiments (*I*) steigt der Massenstrom des Kondensates und erreicht ein lokales Maximum. Dieser Prozess ist mit der Tropfenkondensation verbunden. Am Ende dieser Phase (*I*) erreichen die flüssigen Wassertropfen ihr kritisches Eigenvolumen, welches abhängig von den Versuchsvariablen ist, und erstarrten. Beide Phasenumwandlungsprozesse, Kondensation und Erstarrung, finden während der ersten Phase (*I*) statt.

In der zweiten Phase (*II*) nimmt der Massenstrom des kondensierenden Wassers ab. Auf den erstarrten Tropfen bilden sich eindimensionale Eisdendriten, die allmählich anwachsen und schließlich eine dreidimensional ausgebildete, von oben nicht geschlossene Reifstruktur bilden. In dieser Phase lässt sich lediglich die Verdickung der porösen Reifstruktur beobachten. Der Massenstrom des Kondensates nimmt ab, während noch kein Verdichtungsprozess stattfindet. Der Reif zu Beginn der Kristallwachstumsphase weist die geringste Wärmeleitfähigkeit²⁴ (siehe Abb. 2.14) auf und verstärkt dementsprechend die Isolationswirkung. Der geringere Massenstrom des kondensierten Dampfes führt zu Eisdendriten, um erst am Ende der zweiten Phase den Verdichtungsprozess zu initiieren. Dieser Prozess beginnt, wenn der Verlauf das Minimum erreicht.

Die dritte Phase (*III*) beginnt, wenn der Verlauf des Massenstroms ausfallenden Wassers mit zunehmender Zeit des Experiments steigt. Die Zunahme des Massenstroms des Kondensates beeinflusst den Verdichtungsprozess der zuwachsenden Reifschicht, welcher zu einer Erhöhung des zwischen der feuchten Luft und dem gekühlten Rohr übertragenden Wärmestroms führt. Am Ende der dritten Phase nimmt der zeitliche Gradient des Massenstromzuwachses ab. Der Wärme- und Stoffübertragungsprozess zwischen der feuchten Luft und der gekühlten Reifoberfläche nähert sich einem thermodynamischen Gleichgewichtszustand an. Zusammenfassend finden in der porösen Reifschicht der dritten Phase der Reifbildung die beiden Mechanismen der Verdickung und der Verdichtung statt.

²⁴die Wärmeleitfähigkeit des Wassers ($\lambda \approx 0.6 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) und des Eises ($\lambda \approx 2.0 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$) ist größer als die Wärmeleitfähigkeit des Reifes (λ_R) am Anfang des Reifbildungsprozesses

Masse des Kondensates

Der zeitliche Verlauf der Masse des Kondensates ist in Abbildung 5.2 gezeigt. Diese Abhängigkeit kann man mit ausreichender Genauigkeit mit einer linearen Funktion beschreiben.

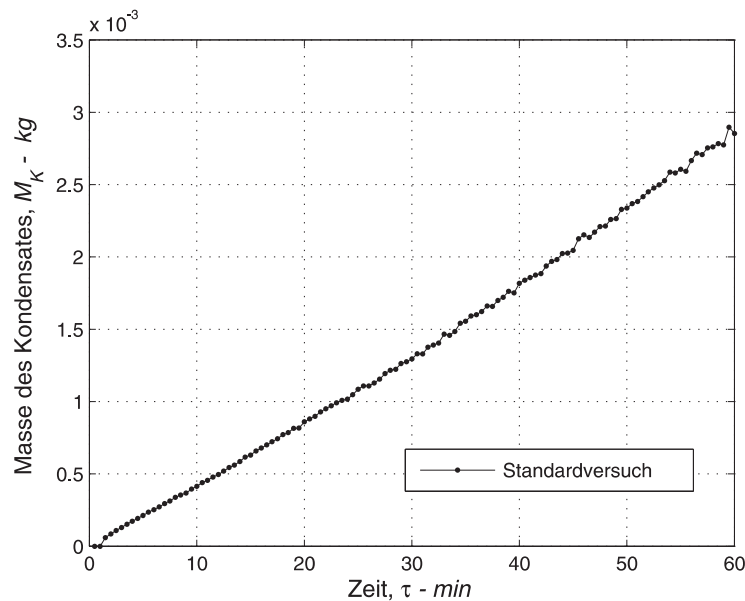


Abbildung 5.2: Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für Standardparameter

Der Maximalwert der Masse des ausfallenden Wassers während der Versuchsdauer entspricht nicht der maximal möglichen Masse des Kondensates. Erst nach dem Erreichen des stationären Zustands erreicht der Verlauf der Kondensatmasse am Ende des Prozesses seinen maximalen Wert. Dieser Zustand kann, abhängig von den Variationsparametern, nach einem mehrstündigen experimentellen Versuch erreicht werden.

Gesamtwärmestrom

Der zeitliche Verlauf des Gesamtwärmestroms (Abb. 5.3) ist mit dem Massenstromverlauf vergleichbar. Der latent freigesetzte Wärmestrom, abhängig von dem Massenstrom des ausfallenden Wassers, und der fühlbare Wärmestrom, welcher an dem Massenstrom der feuchten Luft und der Temperaturdifferenz zwischen der feuchten Luft und der Substratoberfläche (Reifoberfläche) liegt, beeinflussen den Gesamtwärmestrom.

Ähnlich wie für die Masse des Kondensates lässt sich der Verlauf des Gesamtwär-

5.2 Standardparameter

mestroms für drei charakteristische Phasen des Experiments erklären.

In der ersten Phase des Experiments (*I*), wo der übertragene Gesamtwärmestrom steigt und den maximalen Wert erreicht, finden die Kondensation, das Tropfenwachstum und die Tropfenerstarrung statt.

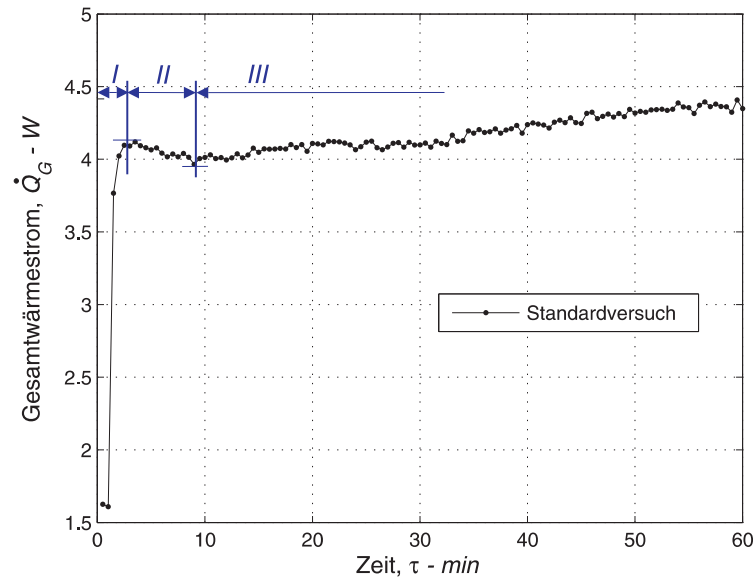


Abbildung 5.3: Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für Standardparameter

In der nächsten Phase (*II*), in der der Gesamtwärmestrom abnimmt, beginnt die Kristallwachstumsphase, die als Verdickungsprozess der Reifschicht bezeichnet wird. Der latente Wärmestrom sinkt mit der Abnahme des Massenstroms des ausfallenden Wassers. Die Isolationswirkung der Reifschicht in der zweiten Phase des Experiments beeinflusst die Erhöhung der Temperatur der äußeren Reifschicht und die Verringerung des fühlbaren Wärmestroms.

In der letzten Phase des Versuchs (*III*) steigt wegen der Verdichtung der porösen Reifstruktur der Massenstrom des Kondensates, also der latent übertragene Wärmestrom. Darüber hinaus führt die Verdichtung zur Abnahme der Temperatur der Reifoberfläche und im Endeffekt zur Erhöhung des Gesamtwärmestroms. Beide Bestandteile des Gesamtwärmestroms, der latente und der fühlbare Wärmestrom (siehe Gl. (4.6)), nehmen in der dritten Phase zu.

Volumen des Reifes

Der zeitliche Reifvolumenverlauf ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Das Reifvolumen steigt parabolisch mit zunehmender Versuchsdauer an und wird nach einer

5.2 Standardparameter

bestimmten Zeit seinen maximalen Wert in einem thermodynamischen Gleichgewichtszustand erreichen.

Eine genaue Erklärung und Interpretation der Reifprofilentwicklung auf der Rohroberfläche ist im Kapitel 2.3.1 gegeben.

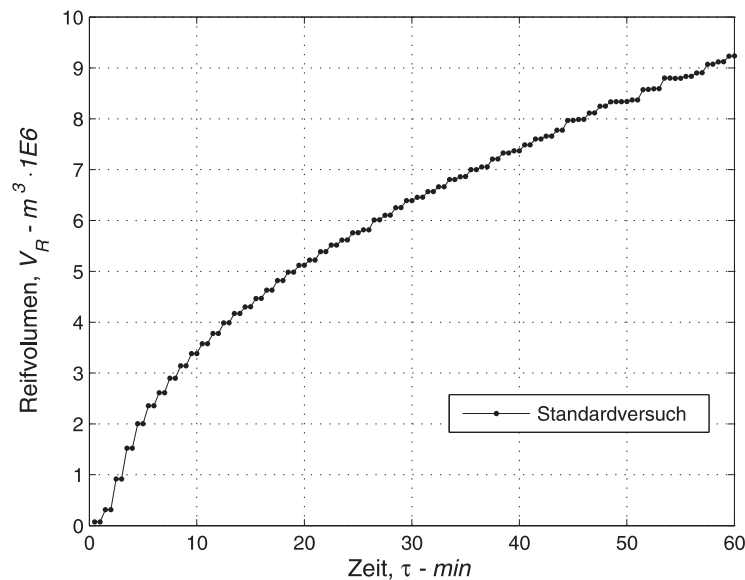


Abbildung 5.4: Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für Standardparameter

Mittlere Reifdichte

Die zeitliche Entwicklung der mittleren Reifdichte auf der gekühlten Rohroberfläche wird in Abbildung 5.5 gezeigt.

In der Abbildung sind zusätzlich als Vergleichswerte die konstanten Dichten von Wasser und Eis eingezeichnet.

Der Reifbildungsprozess beginnt mit der Kondensation des Wasserdampfes. Die Dichte der flüssigen Wassertropfen beträgt $\rho \approx 1000 \text{ kg m}^{-3}$. Nach Erreichen ihres kritischen Volumens²⁵ erstarren die Tropfen, wobei ihre Dichte der Eisdichte von $\rho \approx 920 \text{ kg m}^{-3}$ entspricht.

In der Kristallwachstumsphase, während der Eisdendritenbildung, nimmt die mittlere Reifdichte ab. Bis zum Ende der Kristallwachstumsphase ist die poröse Reifschicht von oben nicht geschlossen (offenporige Struktur) und nicht mit einem

²⁵Das kritische Volumen des Tropfens während des Erstarrungsprozesses ist kleiner als das maximale Tropfenvolumen in der reinen Kondensationsphase, wenn die Substratoberfläche eine höhere Temperatur als die Erstarrungstemperatur hat. Für die Erstarrung ist der kritische Radius des Keimes repräsentativ.

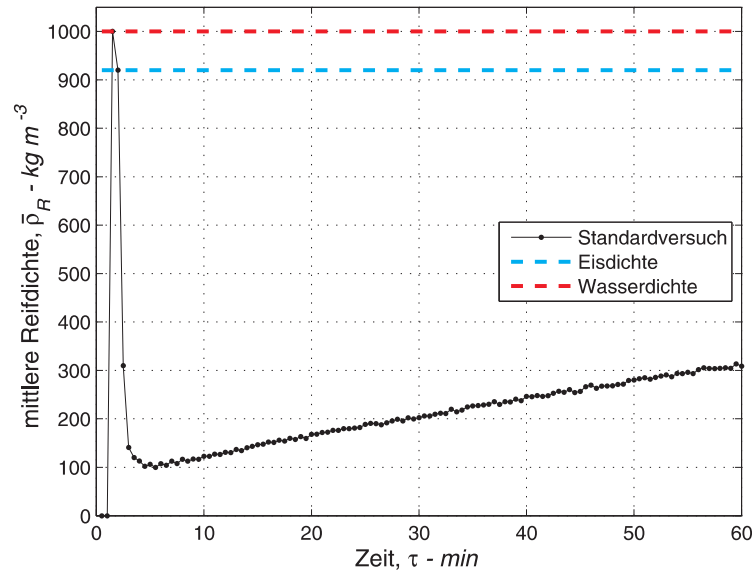


Abbildung 5.5: Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für Standardparameter

geschlossenen Kondensatfilm benetzt. Bei höheren Kondensatmassenströmen als $\dot{M}_D \geq 0.6\ kg\ m^{-2}h^{-1}$ (vgl. Kapitel 2.1), ist die Reifschicht vollständig mit einem Kondensatfilm benetzt und ein Verdichtungsprozess setzt ein, der einen Zuwachs der mittleren Reifdichte bedingt.

Die aus Gleichung (4.11) berechnete mittlere Reifdichte steigt, wenn der Zuwachs der Masse des ausfallenden Wassers größer als der Zuwachs des Reifvolumens ist. Dieses Phänomen lässt sich nach etwa 4 - 5 Minuten der Versuchsdauer feststellen. Dabei ergibt sich ein linearer Anstieg der mittleren Reifdichte durch einen gleichzeitigen Verdickungs- und Verdichtungsprozess. Die mittlere Reifdichte nimmt mit der Versuchsdauer zu und erlangt nach mehreren Stunden ihren maximalen Wert. Dieser ist von den Versuchsparametern abhängig. Aufgrund der Lufteinschlüsse in der Reifstruktur bleibt die mittlere Reifdichte jedoch stets kleiner als die Eisdichte. Für die technischen Anwendungen genügt es, die mittlere Reifdichte zu berechnen und graphisch aufzutragen, um später Berechnungen der Wärmeleitfähigkeit zu ermöglichen.

Es lässt sich eindeutig feststellen, dass in der lokalen Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Reifdichte im Staupunkt, in dem der statische Druck den größten Wert erreicht und die Luftgeschwindigkeit gleich null ist, die Reifstruktur die größte Dichte aufweist.

Reifwachstumsgeschwindigkeit

Der zeitliche Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit während des Versuchs ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Mit Hilfe dieses Diagramms lässt sich der Zeitpunkt des größten Reifvolumenzuwachses und die größte Reifwachstumsgeschwindigkeit ablesen.

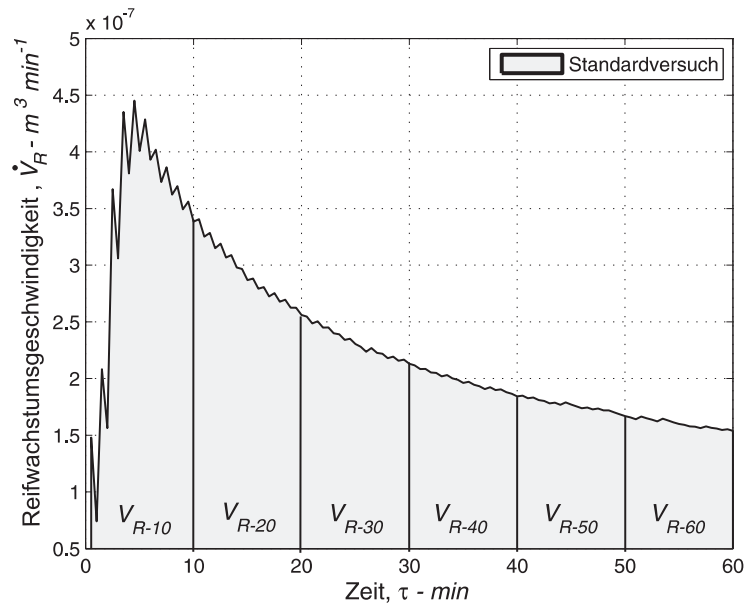


Abbildung 5.6: Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für Standardparameter

Jede gekennzeichnete Fläche auf diesem Diagramm, welche einem Zeitintervall des Experiments entspricht und durch die Kurve der Reifwachstumsgeschwindigkeit und die Zeitachse begrenzt ist, stellt das Volumen des Reifes dar. In dieser Abbildung wurde das gesamte Reifvolumen in sechs zehnminütige Intervalle geteilt.

Es lässt sich feststellen, dass innerhalb der ersten zehn Minuten des Experiments das partielle Reifvolumen am größten ist. Überdies erreicht in diesem Zeitintervall die Reifwachstumsgeschwindigkeit den maximalen Wert.

In späteren Phasen des Experiments nimmt die Reifwachstumsgeschwindigkeit mit der Zeit ab. Der Isolationseffekt verlangsamt den Reifzuwachs. Die partiellen Volumina der gekennzeichneten Reifschichten des Reifschichtbildes (siehe Abb. 2.10) entsprechen den gekennzeichneten Flächen im Diagramm (Abb. 5.6) für die gleichen Variationsparameter und Zeitintervalle.

5.3 Einfluss der Luftparameter

In diesem Unterkapitel werden die Einflüsse der variierten Luftparameter - relative Feuchtigkeit, Luftgeschwindigkeit und Lufttemperatur - auf die wichtigsten Reifparameter und -eigenschaften graphisch dargestellt und besprochen. Die vollständige Parameterstudie ermöglicht eine Analyse der Einflussparameter und des Phänomens der Reifbildung gemäß den Mechanismen der Wärme- und Stoffübertragung.

5.3.1 Relative Feuchtigkeit

Die relative Feuchtigkeit wurde in dem in der Tabelle 3.1 gezeigten Bereich variiert. Die anderen Parameter wurden konstant gehalten. In den experimentellen Untersuchungen ist eine Variation der relativen Feuchtigkeit im Bereich von 30% bis 80% durchgeführt worden.

Masse und Massenstrom des Kondensates für variierende relative Feuchtigkeit

Die relative Feuchte hat nur vernachlässigbaren Einfluss auf die charakteristischen dimensionslosen Kennzahlen (Re- und Pr-Zahl) der durchströmenden Luft. Allerdings steigt mit einer Erhöhung der relativen Feuchte das treibende Konzentrationsgefälle des Wasserdampfes. Bei konstanter Temperatur erhöht zunehmende relative Feuchtigkeit den Wassergehalt und dementsprechend steigt die Wahrscheinlichkeit des Kondensationsprozesses und die Anzahl der Keimstellen (Keimdichte). Der Einfluss der relativen Feuchtigkeit auf den Massenstrom und die Masse des ausfallenden Wassers ist in Abbildungen 5.7 und 5.8 gezeigt. Die experimentellen Versuche zeigen, dass mit steigender relativer Feuchtigkeit der Massenstrom des Kondensates zunimmt.

Die Neigung der Kurven der zeitlichen Verläufe des Massenstroms des Kondensates hat, bei einer zunehmenden relativen Feuchtigkeit, eine steigende Tendenz.

Ähnliche Abhängigkeiten und Ergebnisse wurden experimentell durch Lürer [49] und Langeheinecke [40] für ebenen Platten bestätigt.

Die in der Abbildung 5.8 gezeigten Verläufe der Masse des kondensierten Dampfes, die gleich der Reifmasse sind, steigen mit zunehmender relativer Feuchte und lassen sich ausreichend genau mit einer linearen Abhängigkeit beschreiben.

Im stationären Zustand (gleiches thermodynamisches Potenzial der feuchten Luft und der Reifoberfläche), also wenn die Reifoberflächetemperatur gleich der umge-

5.3 Einfluss der Luftparameter

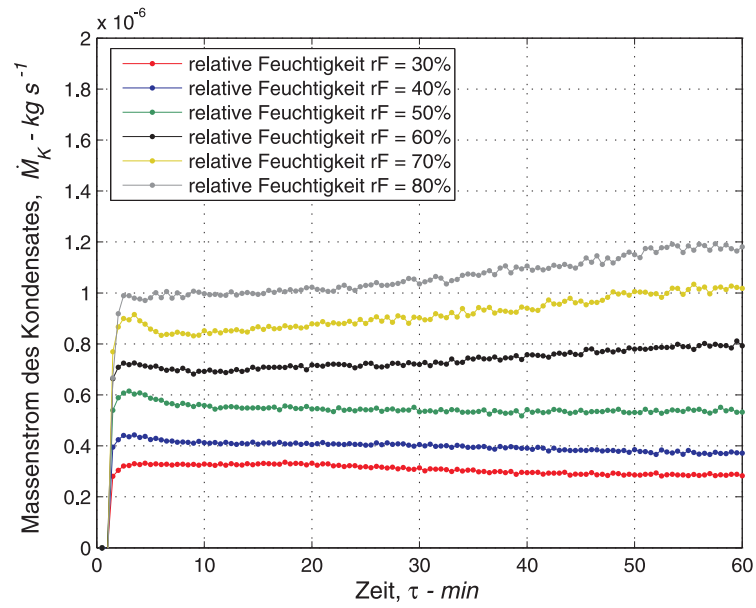


Abbildung 5.7: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende relative Feuchtigkeit

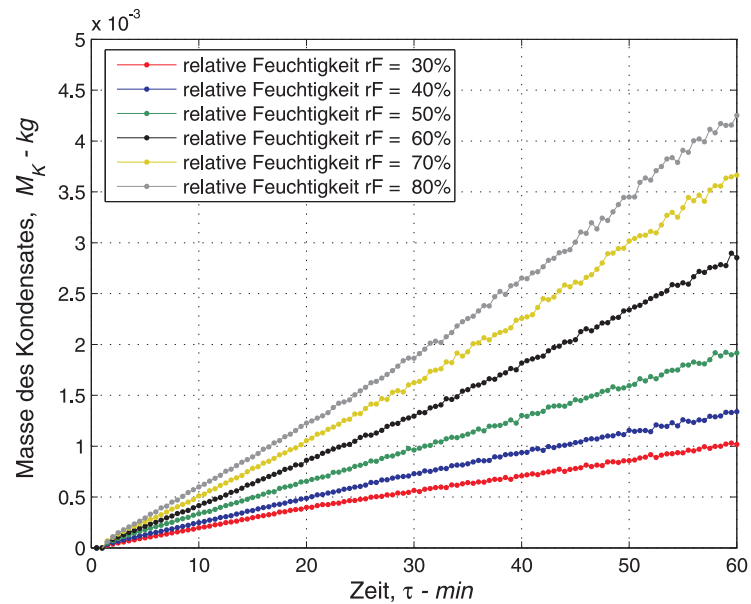


Abbildung 5.8: Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende relative Feuchtigkeit

5.3 Einfluss der Luftparameter

benden Lufttemperatur wird, erreicht die Masse des Kondensates ihren maximalen Wert.

Diese Erscheinung bestimmt das Ende des Stoffübertragungsprozesses und letztendlich des Reifbildungsprozesses. Von diesem Zeitpunkt des Experiments, welcher in diesem Versuch von der relativen Feuchte abhängig ist, wird die Reifstruktur eine konstante Dichte sowie konstante Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

Gesamtwärmestrom für variierende relative Feuchtigkeit

Der steigende Massenstrom ausfallenden Wassers beeinflusst die Zunahme des latenten Anteils des Gesamtwärmestroms und verstärkt, durch den Verdichtungsprozess der porösen Reifstruktur, den fühlbaren übertragenden Wärmestrom. Der zeitliche Verlauf des Gesamtwärmestroms, als die Summe von den beiden Bestandteilen (siehe Gl. (4.6)) für die variierende relative Feuchtigkeit, ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

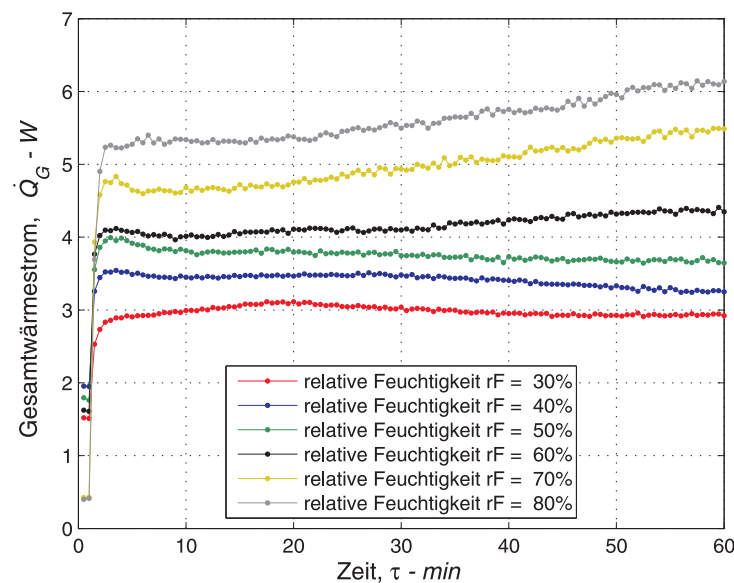


Abbildung 5.9: Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende relative Feuchtigkeit

Die Steigung der Kurven des gesamten Wärmestroms ist mit den Massenstromverläufen vergleichbar. Zusammenfassend lässt sich eindeutig feststellen, dass der Gesamtwärmestrom für eine variierende relative Feuchtigkeit mit steigendem Wassergehalt zunimmt.

Reifvolumen, Reifwachstumsgeschwindigkeit und mittlere Reifdichte für variierende relative Feuchtigkeit

Mit steigender relativer Feuchte und entsprechendem Wassergehalt nimmt die Masse des Reifes und das Reifvolumen zu. Die parabolischen Verläufe sind in Abbildung 5.10 dargestellt.

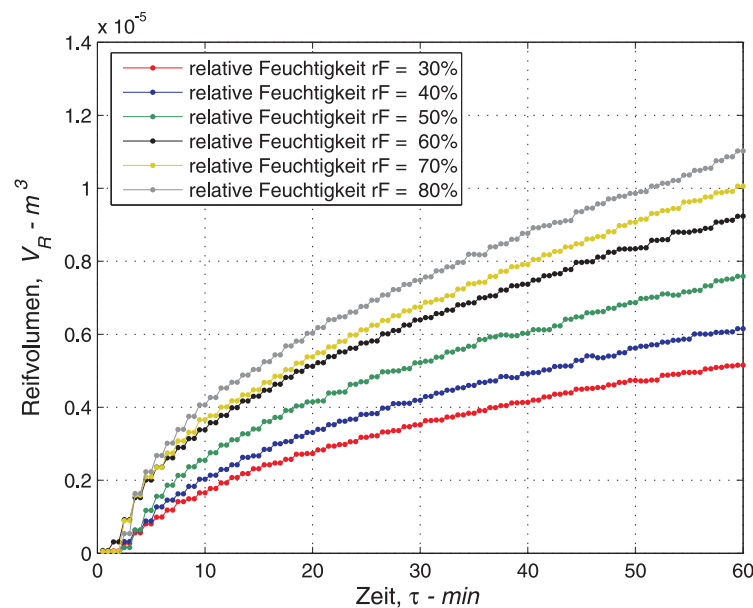


Abbildung 5.10: Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende relative Feuchtigkeit

Der Wassergehalt beeinflusst den Kondensationsprozess. In der ersten Phase der Keimbildung haben die aus der feuchten Luft mit höherer relativer Feuchte kondensierten Wassertröpfchen ein größeres Eigenvolumen. Sie wachsen wesentlich schneller zu und erreichen früher den kritischen Radius des Keimes im Vergleich zu der Tropfenkondensation des Wasserdampfes mit geringerem Wassergehalt.

Die Erklärung dieser Erscheinung ist in Abbildung 5.11 illustriert. Die Zunahme der relativen Feuchte erhöht die Tropfendichte auf der Substratoberfläche und beeinflusst schnelleres Tropfenwachstum. Deswegen steigen auch die Reifwachstumsgeschwindigkeiten mit zunehmender relativer Feuchte an.

In der Abbildung 5.11 sind zusätzlich die maximalen Werte der Reifwachstumsgeschwindigkeiten mit einer Kurve verbunden. Bei höheren Wassergehalten wird das Maximum der Reifzuwachsgeschwindigkeit eher erreicht.

5.3 Einfluss der Luftparameter

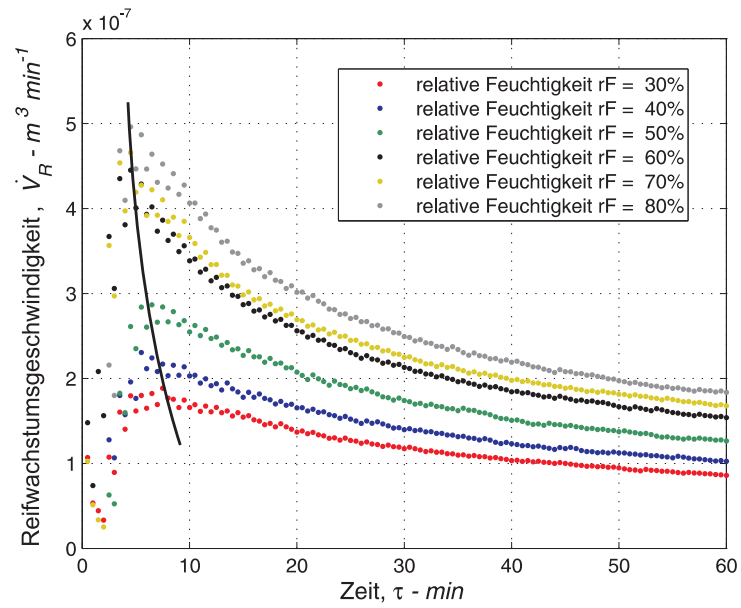


Abbildung 5.11: Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende relative Feuchtigkeit

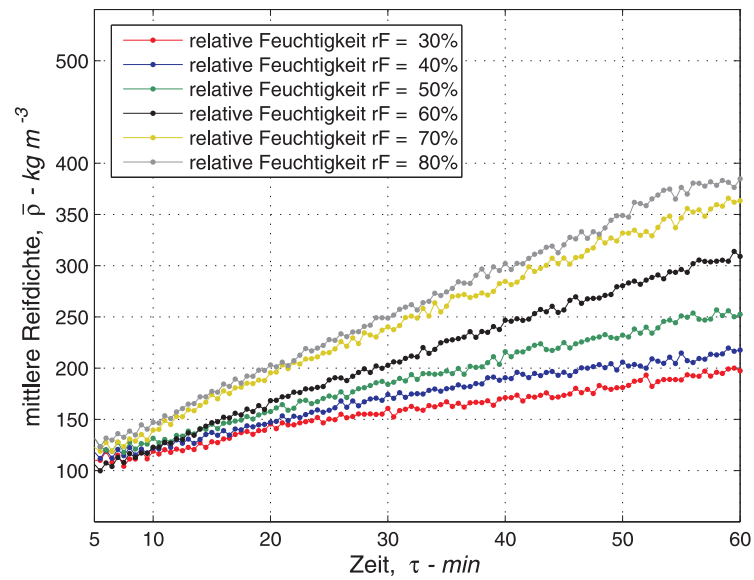


Abbildung 5.12: Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende relative Feuchtigkeit

5.3 Einfluss der Luftparameter

In der ersten Phase der Reifbildung, wenn der Gradient des Reifzuwachses am größten ist, dominiert der Verdickungsprozess. In der späteren Phase, wenn der zeitliche Verlauf flacher ist, spielt der Verdichtungsprozess die maßgebende Rolle im Wachstumsprozess des Reifes.

Der zeitliche Verlauf der mittleren Reifdichte ist in der Abbildung 5.12 dargestellt. Die erste Phase der Reifbildung, die Kondensation und die Tropfenerstarrung, wurden in der graphischen Darstellung nicht berücksichtigt. In den industriellen Anwendungen spielen diese Phasen der Reifbildung keine wichtige Rolle. Eine poröse Reifstruktur entwickelt sich erst in der späteren Phase des Experiments, sie ist hauptsächlich für die Isolationswirkung bei der Wärmeübertragung verantwortlich. Deswegen beginnen die zeitlichen Verläufe erst nach einer Dauer von fünf Minuten. Die mittlere Reifdichte steigt mit zunehmender relativer Feuchtigkeit. Die auf der gekühlten Rohroberfläche entstehende Reifstruktur hat im Vergleich zu einer ebenen Platte eine größere Dichte aufgrund des unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofils.

Diese Abhängigkeiten und Einflüsse der relativen Feuchtigkeit auf die mittlere Reifdichte wurden durch anderen Autoren wie Hofmann [30], Lürer, [49], O’Neal [57], Langeheinecke [40], Schropp [71] und Tramel et al. [80] experimentell bestätigt.

5.3.2 Luftgeschwindigkeit

In diesem Unterkapitel wird der Einfluss der variierenden Reynoldszahlen auf die wichtigsten Reifparameter gezeigt. Die Reynoldszahl am Einlauf zur Messstrecke wurde im Bereich der laminaren Durchströmung von 700 bis 1100 variiert.

Masse und Massenstrom des Kondensates für variierende Luftgeschwindigkeit

Steigende Luftgeschwindigkeit erhöht für konstante Luftdichte²⁶ und für konstanten Querschnitt des Kanals den Massenstrom der feuchten Luft und dementsprechend die Masse des aus der feuchten Luft kondensierten Wasserdampfes.

Der Massenstrom (siehe Abb. 5.13) sowie die Masse (siehe Abb. 5.14) des Kondensates steigen mit zunehmenden Reynoldszahlen.

Diese Abhängigkeit von der Reynoldszahl bestätigen experimentelle Versuche von anderen Forschern (siehe Verzeichnis bei Langeheinecke [40] S. 21).

²⁶die Dichte der feuchten Luft ist von der Temperatur, dem Druck und dem Wassergehalt abhängig

5.3 Einfluss der Luftparameter

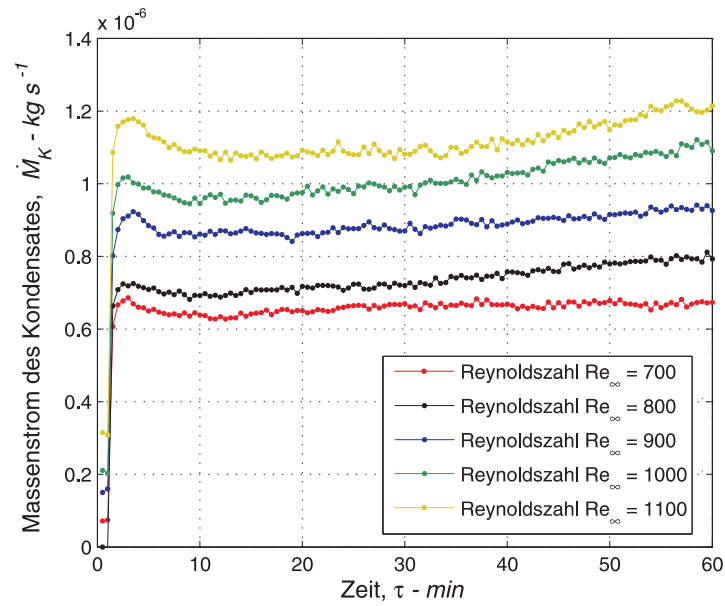


Abbildung 5.13: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Luftgeschwindigkeit

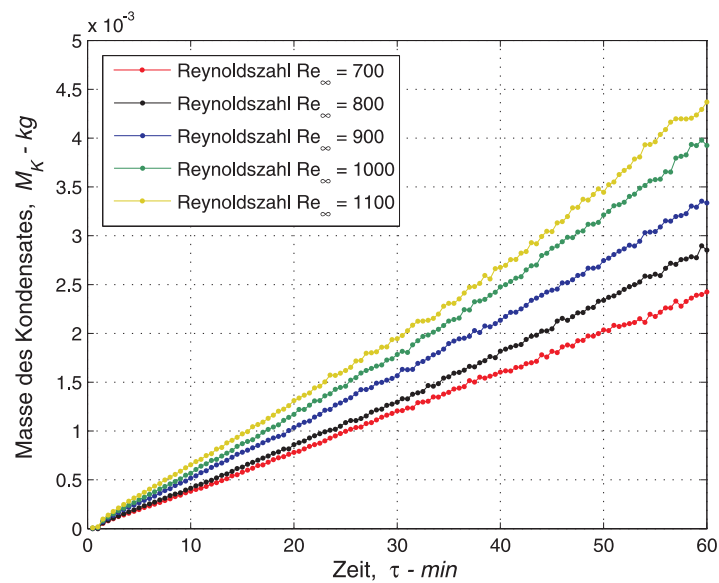


Abbildung 5.14: Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Luftgeschwindigkeit

5.3 Einfluss der Luftparameter

Die Luftgeschwindigkeit der feuchten Luft im Kanal beeinflusst durch den dynamischen Druck die Erhöhung des Verdichtungseffektes der Reifstruktur. Es wurde beobachtet, dass die Reifkontur bei höheren Luftgeschwindigkeiten eine geometrische Deformierung aufweist.

In der Anfangsphase des Versuchs der Reifbildung nimmt die Dicke der anfänglichen Reifschicht mit zunehmender Reynoldszahl wegen den Auswirkungen der höheren Luftgeschwindigkeiten und höheren Massenströmen ausfallenden Wassers ab.

Dieses Phänomen, bestätigt experimentell durch Sanders [66] auf einer ebenen, gekühlten Platte, verstärkt die Verdichtung der porösen Reifstruktur in der Anfangsphase. Im Endeffekt sind für steigende Luftgeschwindigkeiten (ausgedrückt über die Reynoldszahlen am Eintritt zur Messstrecke) zwei bedeutsame Phänomene festzustellen: die Zunahme des Kondensates abhängig von der Erhöhung des Massenstroms feuchter Luft, und die Verstärkung des Verdichtungs- und Verdickungsprozesses. Der Einfluss auf die Intensivierung der beiden morphologischen Prozesse ist von der Geometrie des Versuchskörpers abhängig.

Gesamtwärmestrom für variierende Luftgeschwindigkeit

Der zeitliche Verlauf des Gesamtwärmestroms für verschiedene Reynoldszahlen ist in Abbildung 5.15 dargestellt.

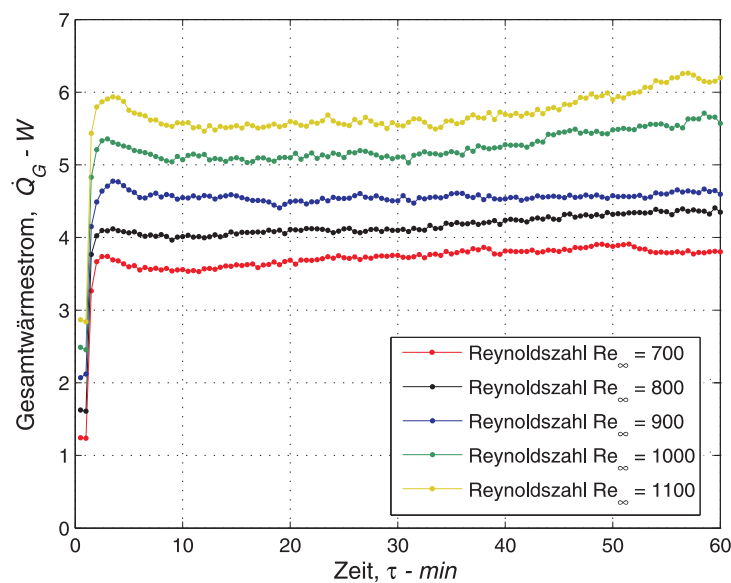


Abbildung 5.15: Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Luftgeschwindigkeit

5.3 Einfluss der Luftparameter

In der graphischen Darstellung ist zu erkennen, dass die Steigung der Wärmestromkurven mit den Massenstromverläufen vergleichbar ist, was den maßgeblichen Einfluss des latenten Bestandteils des Gesamtwärmestroms verdeutlicht.

Zusätzlich ist auch der zweite Bestandteil, der fühlbare Wärmestrom zu berücksichtigen, welcher von dem Massenstrom der feuchten Luft und der Reifoberflächentemperatur abhängt. Der fühlbare Wärmestrom steigt mit der Zunahme des Massenstroms der feuchten Luft.

Wie zuvor erwähnt führen höhere Reynoldszahlen zur Intensivierung des Verdichtungsprozesses. Die poröse Reifstruktur mit höherer Dichte hat eine geringere Isolationswirkung und ermöglicht somit die Übertragung von höheren fühlbaren Wärmeströmen.

Reifvolumen, Reifwachstumsgeschwindigkeit und mittlere Reifdichte für variierende Luftgeschwindigkeit

Die in Abbildung 5.16 gezeigten zeitlichen Verläufe des Reifvolumens stellen den Einfluss der Reynoldszahl auf das Reifvolumen dar.

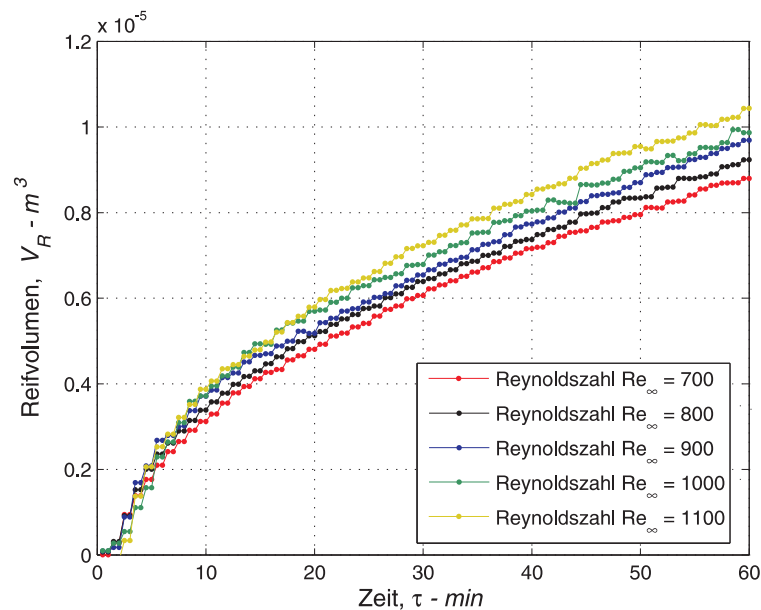


Abbildung 5.16: Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Luftgeschwindigkeit

Mit steigender Luftgeschwindigkeit steigt die Masse des Kondensates und dementsprechend die Reifdicke auf der gekühlten Rohroberfläche. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten beeinflusst der Verdichtungsprozess die Reifbildung stärker als der

5.3 Einfluss der Luftparameter

Verdickungsprozess.

Die Reifwachstumsgeschwindigkeiten (siehe Abb. 5.17) steigen mit zunehmenden Reynoldszahlen. Dieses Phänomen lässt sich damit erklären, dass die höheren Luftgeschwindigkeiten den dynamischen Druck der feuchten Luft im Kanal deutlich vergrößern, die Reifstruktur deformieren sowie zugleich den Zuwachs der Eisdendriten begrenzen, aber auch die Verdichtung der Reifstruktur begünstigen.

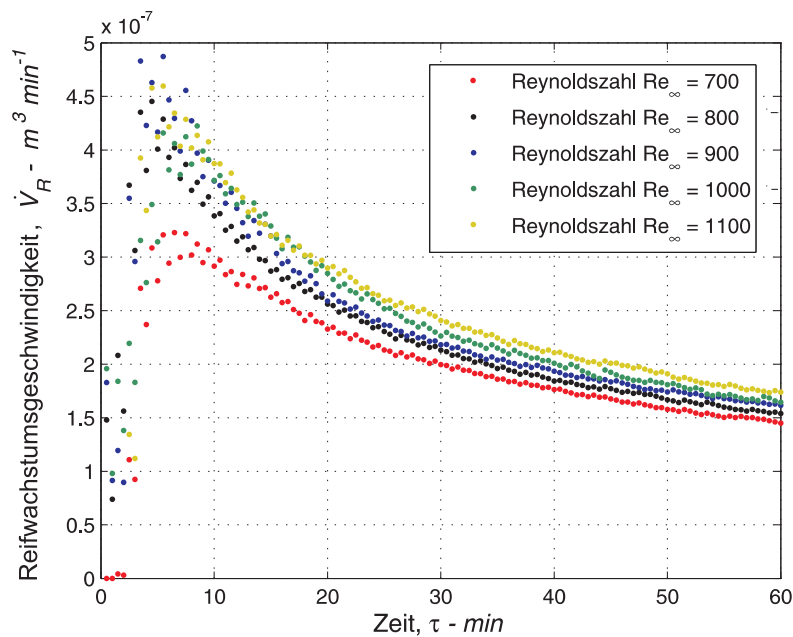


Abbildung 5.17: Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Luftgeschwindigkeit

Für längere Zeiten ergibt sich ein asymptotischer Abfall der Wachstumsgeschwindigkeit auf Null, d.h. das Erreichen des stationären Zustands.

Die in der Abbildung 5.18 gezeigten zeitlichen Verläufe der mittleren Reifdichte steigen mit zunehmenden Reynoldszahlen. Die maximalen Werte der mittleren Reifdichte für die Rohroberfläche liegen im Vergleich zur ebenen Platte in einem höheren Bereich.

Darauf hat auch die Geometrie des Versuchskörpers einen bedeutenden Einfluss. Für das im Kanal quer eingebaute Rohr entsteht ein Staupunkt, an dem die poröse Reifstruktur die höchste Dichte erreicht. Darüber hinaus bildet sich für höhere Reynoldszahlen auf der Seite des Rohres, die dem Einlauf der feuchten Luft zuge-

5.3 Einfluss der Luftparameter

wandt ist, eine vereiste Schicht auf der Reifstruktur.

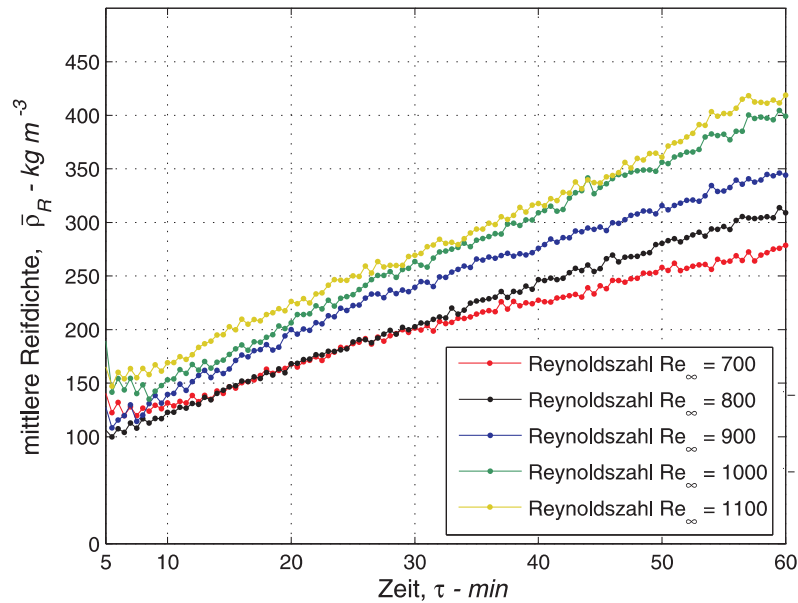


Abbildung 5.18: Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Luftgeschwindigkeit

Es lässt sich auch feststellen, dass die steigenden Reynoldszahlen die Zunahme der Keimstellenanzahl²⁷ erhöhen.

5.3.3 Lufttemperatur

Im Folgenden wird der Einfluss der Lufttemperatur auf die Reifeigenschaften beschrieben. Die Versuche wurden für drei Lufttemperaturen ($t_{fL} = 22\text{ }^\circ\text{C}$, $25\text{ }^\circ\text{C}$ und $28\text{ }^\circ\text{C}$) durchgeführt. Gemäß dem Versuchsprogramm werden die anderen Parameter konstant gehalten (siehe Tabelle 3.1).

Masse und Massenstrom des Kondensates für variierende Lufttemperatur

Die Abhängigkeit des Massenstroms des Kondensates von den Lufttemperaturen ist in Abbildung 5.19 gezeigt. Wird die Temperatur für gleich bleibende relative Feuchtigkeit erhöht, steigt der Wassergehalt an. Mit steigendem Wassergehalt nimmt die Wahrscheinlichkeit des Kondensationsprozesses zu, so dass mehr Wasserdampf aus der feuchten Luft kondensiert.

²⁷siehe Hayashi et al. [28] und Sepsy [87]

5.3 Einfluss der Luftparameter

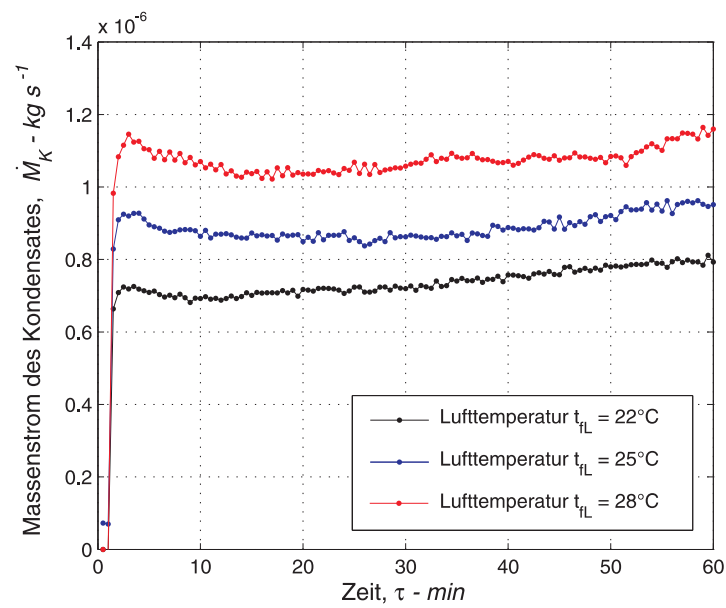


Abbildung 5.19: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Lufttemperatur

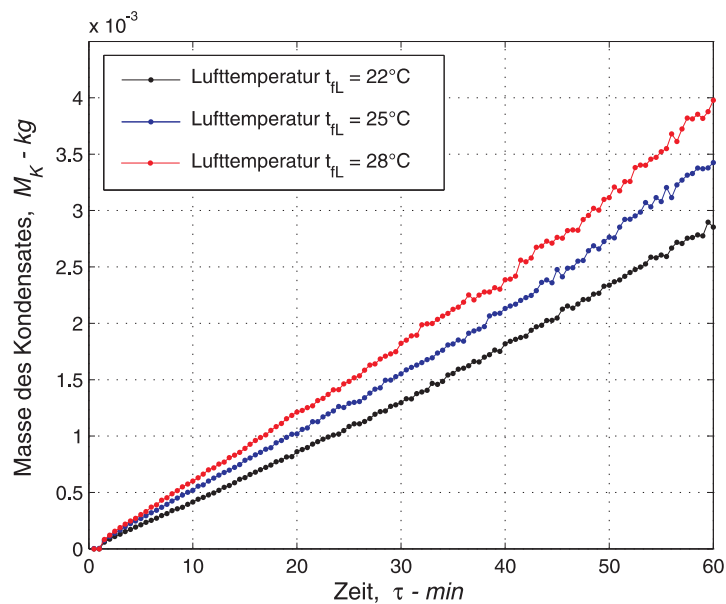


Abbildung 5.20: Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Lufttemperatur

5.3 Einfluss der Luftparameter

Die Ergebnisse bestätigen diesen Zusammenhang. Der Massenstrom ausfallenden Wassers steigt mit der Zunahme der Lufttemperatur.

Die Masse des Kondensates für variierende Lufttemperatur ist in Abbildung 5.20 dargestellt. Die Verläufe lassen sich ähnlich wie zuvor für die variierenden relativen Feuchtigkeiten und variierenden Reynoldszahlen mit einer linearen Abhängigkeit beschreiben und haben steigende Tendenz.

Gesamtwärmestrom für variierende Lufttemperatur

Der zeitliche Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Lufttemperatur ist in Abbildung 5.21 gezeigt.

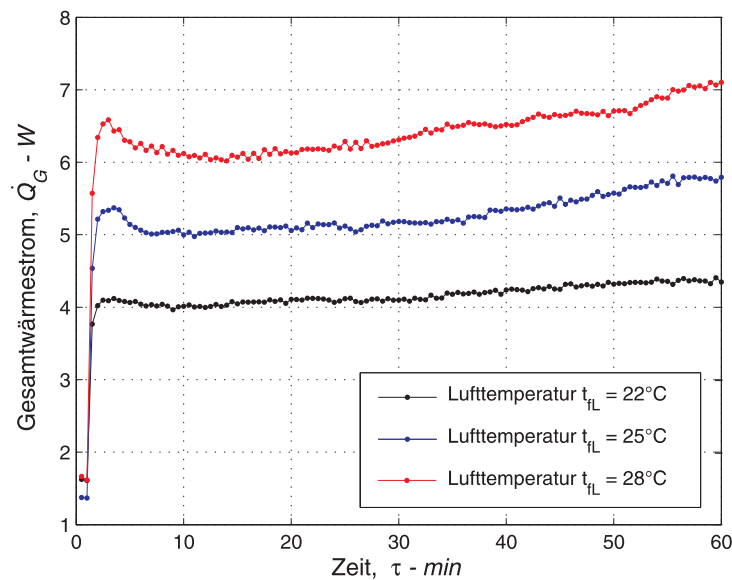


Abbildung 5.21: Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Lufttemperatur

Wie bereits zuvor dargestellt, steigt die Masse des aus der feuchten Luft kondensierten Wasserdampfes mit zunehmender Lufttemperatur. Die Wassertropfen erstarren nach dem Erreichen eines kritischen Radius, welcher unter anderem von der Substratunterkühlung ΔT_S ²⁸ abhängt, und bilden eine poröse Reifschicht. Die Temperatur der umgebenden Luft spielt in der Abkühlungsphase des Tropfens eine wichtige Rolle. Für höhere Lufttemperaturen dauert die Phase länger.

Der Tropfenzuwachs endet, wenn ein Tropfen unterkühlt wird und dann erstarrt. Die Stoffübertragung zwischen dem Wasserdampf der feuchten Luft und dem flüssigen Wassertropfen, beschrieben mit dem ersten Fick'schen Gesetz, ist von der

²⁸siehe Kapitel 2.1, Gleichung (2.4)

5.3 Einfluss der Luftparameter

Temperatur abhängig und steigt mit zunehmender Lufttemperatur. Der Diffusionskoeffizient, definiert als Proportionalfaktor zwischen dem übertragenen Massenstrom und der treibenden Kraft des Stoffübertragungsprozesses, ist temperaturabhängig.

Im Endeffekt erreichen die Wassertropfen in der Abkühlungsphase für höhere Lufttemperaturen und den gleichen Unterkühlungsgrad ΔT_S ein größeres kritisches Eigenvolumen als Resultat des Tropfenwachstums- und Tropfenerstarrungsprozesses. Überdies vergrößert der steigende Massenstrom des Kondensates den latenten Anteil des Gesamtwärmestroms. Der fühlbare Wärmestrom steigt mit der Lufttemperatur, also mit der treibenden Kraft des Wärmeübertragungsprozesses. Darüber hinaus führt der Zuwachs der Masse des Kondensates zur Beschränkung der Isolationswirkung der Reifschicht durch die Verdichtung der Reifstruktur und verstärkt demzufolge den fühlbaren Wärmestrom.

Reifvolumen, Reifwachstumsgeschwindigkeit und mittlere Reifdichte für variierende Lufttemperatur

Die zeitlichen Verläufe des Reifvolumens sind in Abbildung 5.22 gezeigt. Das Reifvolumen nimmt mit steigender Lufttemperatur parabolisch zu. Der Einfluss der steigenden Lufttemperatur führt zur Vergrößerung der Masse des Reifes und des Reifvolumens.

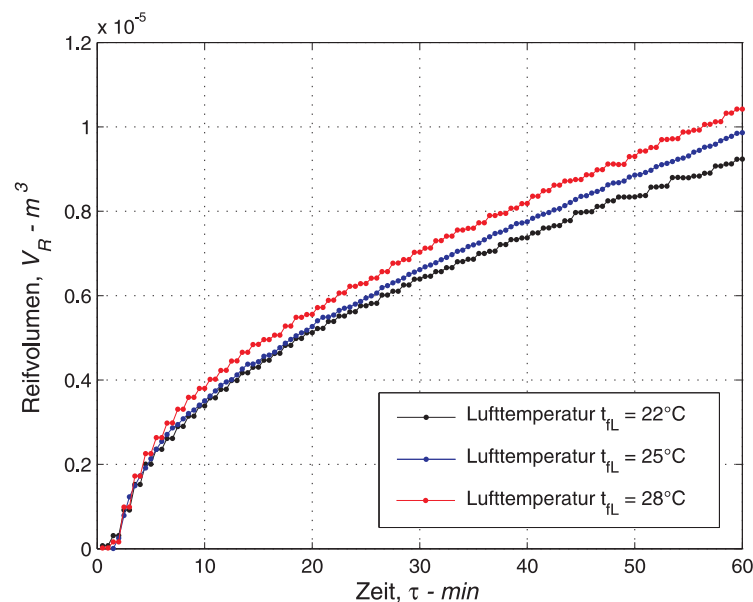


Abbildung 5.22: Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Lufttemperatur

5.3 Einfluss der Luftparameter

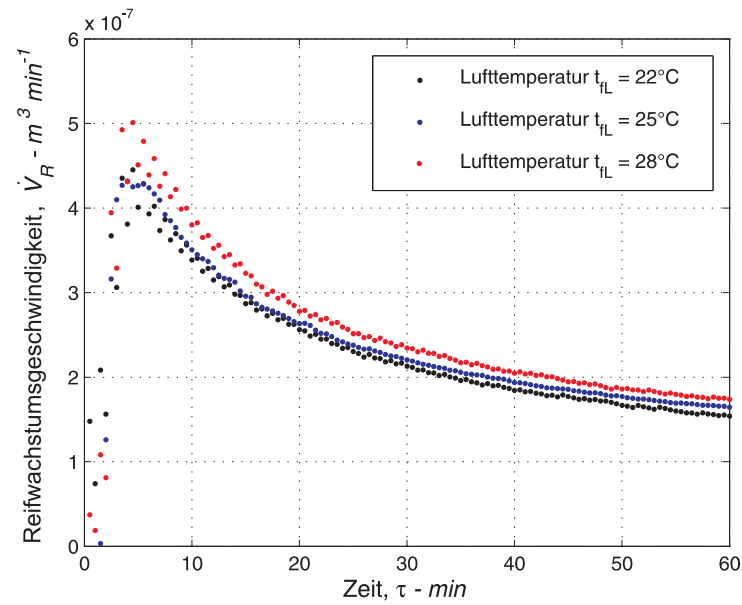


Abbildung 5.23: Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Lufttemperatur

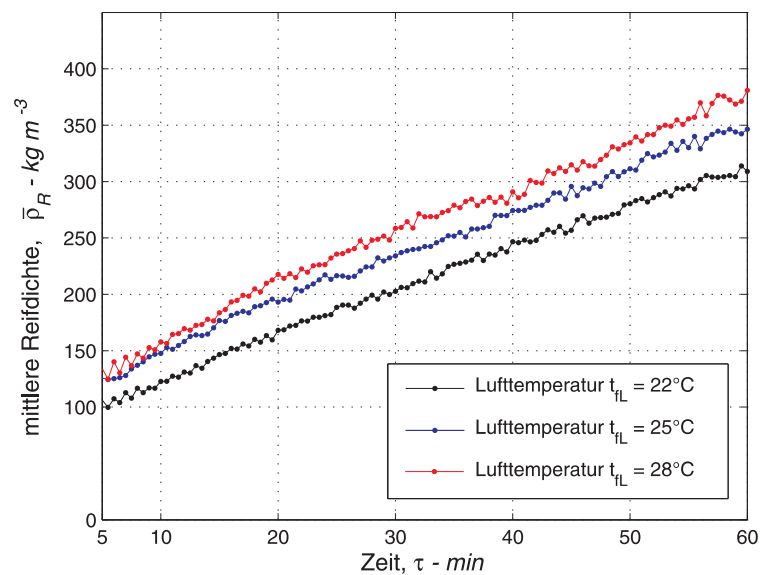


Abbildung 5.24: Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Lufttemperatur

Die Reifwachstumsgeschwindigkeit steigt mit Erhöhung der Lufttemperatur. Der Abbildung 5.23 lässt sich entnehmen, dass die maximalen Werte der Reifwachstumsgeschwindigkeit bei verschiedenen Temperaturen zur gleichen Zeit des Experiments erreicht werden. In der späteren Phase nimmt wegen der gleichzeitigen Verdickungs- und Verdichtungsprozesse die Reifwachstumsgeschwindigkeit ab und strebt gegen Null, wenn ein thermodynamischer Gleichgewichtszustand erreicht wird.

Die Verläufe der mittleren Reifdichte sind in Abbildung 5.24 dargestellt.

Die Werte der mittleren Reifdichte steigen mit der Lufttemperatur und sie lassen sich in einem einstündigen Versuch linear über der Zeit beschreiben.

Ähnliche Ergebnisse der mittleren Reifdichte, in denen die steigenden Tendenzen des Reifdichtezuwachses für zunehmende Lufttemperaturen feststellbar sind, haben u.a. Lüer [49], Lee et al. [44] und Hofmann [30] experimentell bestätigt.

5.4 Variierende Substratoberflächenparameter

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Substratoberflächenparameter auf die Reifeigenschaften besprochen und in graphischer Form präsentiert. Zu den variierenden Substratoberflächenparametern gehören die Temperatur des gekühlten Rohres, ihre Struktur und Rauigkeit. Der Variationsbereich für die drei Parameter ist in Tabelle 3.1 angegeben.

Interessante Ergebnisse zeigen auch experimentelle Untersuchungen auf strukturierten Oberflächen. Dazu gehört zum einen die Rauigkeit, zum anderen die Struktur der Oberfläche, welche hydrophobe oder hydrophile Eigenschaften aufweisen kann.

Bei der Entwicklung der Nanotechnologie spielen die Oberflächenstrukturen in den technischen Anwendungen eine immer wichtigere und bedeutendere Rolle. Beispielsweise sind die selbstreinigenden hydrophoben Lotus-Effekt[®]-Oberflächen, die auf der Nachahmung hydrophober Pflanzenblätter beruhen, für Fassadenfarben (Lotusan[®] der Firma Sto AG) sowie Dachziegel (Erlus-Lotus[®]) geeignet²⁹.

²⁹man kann in der Literatur auch die Begriffe „super“- und „ultrahydrophobe“ finden, welche selbstreinigende hydrophobe Oberfläche beschreiben. Eine interessante Beschreibung von nanostrukturierten ultrahydrophoben Oberflächen ist in der Dissertation von Flemming [20] enthalten

5.4.1 Variierende Substratoberflächentemperatur

Die experimentellen Untersuchungen wurden für verschiedene Substratoberflächentemperaturen, die auf der äußeren Oberfläche des Rohres gemessen sind, durchgeführt. Die Temperaturen des polierten Rohres C1 betragen $t_w = -7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Reynoldszahl, relative Feuchtigkeit und Lufttemperatur wurden konstant gehalten.

Masse und Massenstrom des Kondensates für variierende Substratoberflächentemperatur

Die zeitlichen Verläufe des Massenstroms des Kondensates sind in Abbildung 5.25 dargestellt.

Die Substratunterkühlung bestimmt den maximalen Massenstrom ausfallenden Wassers. Mit abnehmender Temperatur des Rohres steigt bei konstanter Lufttemperatur die treibende Kraft des Wärmeübertragungsprozesses.

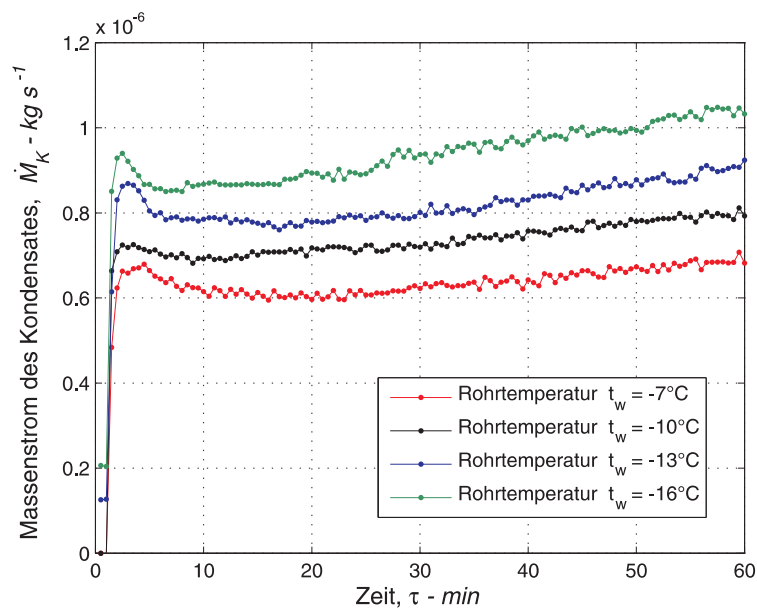


Abbildung 5.25: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Rohrtemperatur

Das heißt, es vergrößert sich der Unterkühlungsgrad ΔT_S , welcher als die Differenz zwischen der Substratoberflächentemperatur (evt. Reifoberflächentemperatur) und der Gleichgewichtstemperatur des Erstarrungsvorganges definiert ist. Aus der graphischen Darstellung folgt, dass die Experimente die Zunahme des Massenstroms des Kondensates für abnehmende Rohrtemperaturen bestätigen.

5.4 Variierende Substratoberflächenparameter

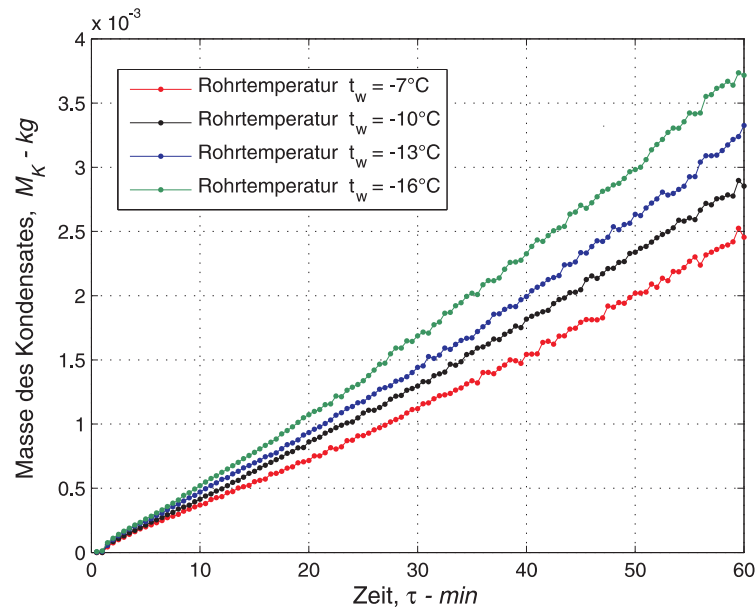


Abbildung 5.26: Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Rohrtemperatur

Die Massenströme weisen eine mit der Zeit steigende Tendenz auf. Niedrigere Rohrtemperaturen beeinflussen den kritischen Radius des Tropfens, welcher mit zunehmendem Unterkühlungsgrad abnimmt, und die Dynamik des Eissäulenzuwachses. Der Einfluss der tieferen Temperaturen ist auch in der Tropfendichte, also in der Anzahl der Keimstellen feststellbar. Die lokale Unterkühlung der Substratoberfläche bei niedrigeren Temperaturen begünstigt auch die Erhöhung der Keimstellenanzahl.

Die Masse des Kondensates als Funktion der Zeit (siehe Abbildung 5.26) steigt mit abnehmenden Rohrtemperaturen.

Gesamtwärmestrom für variierende Substratoberflächentemperatur

Die Abnahme der Substratoberflächentemperatur erhöht die treibende Kraft des fühlbaren Wärmestroms. Der auf der Reifschicht ausfallende höhere Wassermassenstrom dringt in die poröse Reifstruktur ein und führt zu ihrer Verdichtung und zu einer Reduzierung des Isolationseffektes.

Die höhere Dichte der Reifstruktur bewirkt die Abnahme der Reifschichttemperatur, verstärkt also den fühlbaren Wärmestrom.

Es lässt sich eindeutig feststellen, dass die Verdickungs- und Verdichtungsprozesse gekoppelt sind und sich ihre Mechanismen auf den latenten und fühlbaren Wärmestrom auswirken.

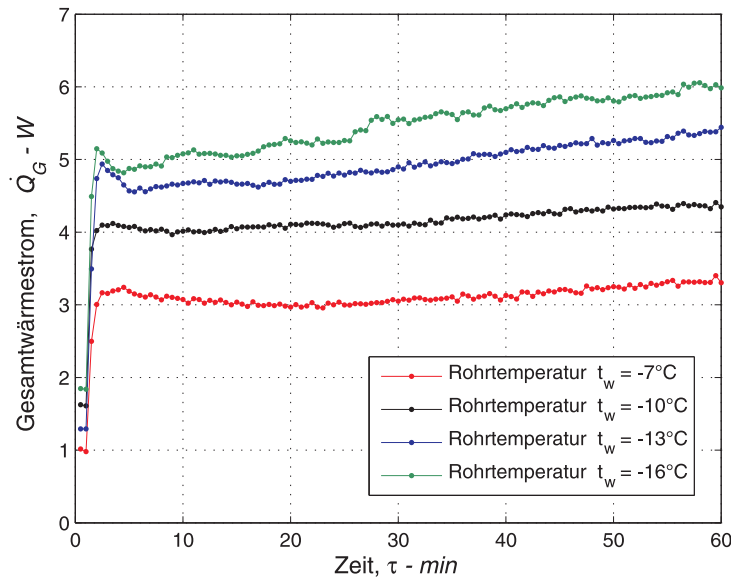


Abbildung 5.27: Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Rohrtemperatur

Die in der Abbildung 5.27 dargestellten zeitlichen Abhängigkeiten des Gesamtwärmestroms sind von der Masse des Kondensates abhängig und haben ähnliche steigende Verläufe.

Daraus folgt, dass der Massenstrom des ausfallenden Wassers den Gesamtwärmestrom maßgeblich bestimmt.

Reifvolumen, Reifwachstumsgeschwindigkeit und mittlere Reifdichte für variierende Substratoberflächentemperatur

Mit der Abnahme der Substratoberflächentemperatur steigt die Masse des Kondensates, was die Verdichtungs- und Verdickungsprozesse intensiviert. Das Reifvolumen nimmt mit abnehmender Substratoberflächentemperatur zu und hat einen parabolischen Verlauf über der Zeit. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.28 gezeigt. Die Reifwachstumsgeschwindigkeit ist von der Temperatur des Rohres abhängig und steigt mit ihrer Abnahme (siehe Abb. 5.29).

Es lässt sich beobachten, dass die Maxima der einzelnen Verläufe für die niedrigen Temperaturen früher erreicht werden. Wie schon erwähnt, wird für tiefere Temperaturen des Versuchskörpers die Dauer der Keimbildungsphase und des Tropfenzuwachses kürzer. Die Tropfen erreichen auch nur ein kleineres Eigenvolumen.

Die mittlere Reifdichte, als das Verhältnis der gemessenen Kondensatmasse zu dem gemessenen Reifvolumen, ist in Abbildung 5.30 dargestellt.

5.4 Variierende Substratoberflächenparameter

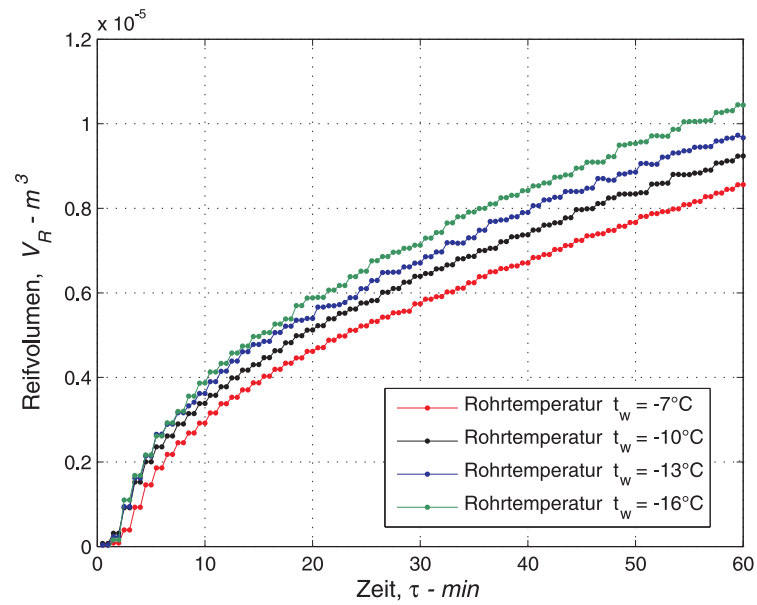


Abbildung 5.28: Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Rohrtemperatur

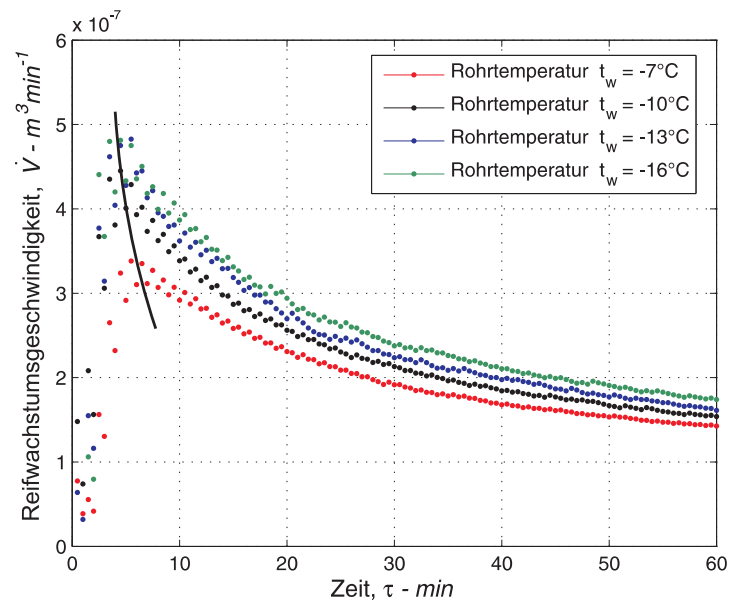


Abbildung 5.29: Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Rohrtemperatur

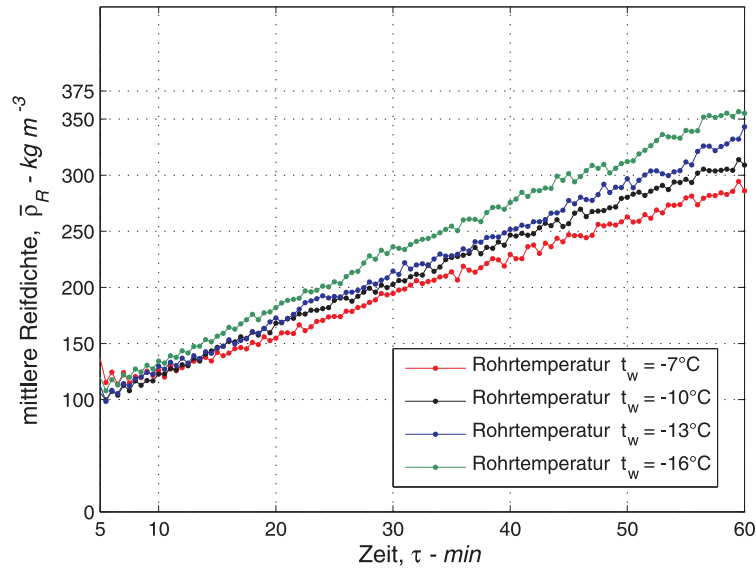


Abbildung 5.30: Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Rohrtemperatur

Es lässt sich feststellen, dass die mittleren Reifdichten mit Abnahme der Substratoberflächentemperatur zunehmen.

5.4.2 Variierende Substratoberflächenstruktur

Unter dem Begriff Substratoberflächenstrukturen werden hier die Benetzungseigenschaften der untersuchten Substratoberflächen verstanden. In der Fachliteratur kann man nur wenige Publikationen zum Thema Reifbildung auf strukturierten, hydrophoben Oberflächen finden. In der Doktorarbeit von Langeheinecke [40] wurden teilweise experimentelle Ergebnisse der Reifbildung auf einer ebenen Platte mit angeklebter Lotusfolie präsentiert. Es wurde festgestellt, dass die auf der Lotusoberfläche erstarrenden Wassertropfen im Vergleich zu hydrophilen Strukturen keine Kristallisationsfront aufweisen.

Dies lässt sich mit dem Einfluss der Geometrie der gekühlten Substratoberfläche erklären. Eine wesentliche Charakteristik des Lotus-Effekts[®] ist, dass die Wassertropfen bei einer Neigung der Substratoberfläche eine Abrollbewegung ausführen, ohne Flüssigkeitsreste zu hinterlassen. Damit dieser Effekt auftritt, wird eine Neigung der Oberfläche mit einem Winkel $\gtrsim 10^\circ$ benötigt³⁰. Deshalb ist für eine ebene, horizontal eingebaute Platte dieser Effekt nicht feststellbar.

³⁰Doktorarbeit von Flemming [20]

5.4 Variierende Substratoberflächenparameter

Der kritische minimale Neigungswinkel, welcher Abrollwinkel genannt wird, ist von dem Tropfenvolumen abhängig.

In den Reifbildungsprozessen liegt die Temperatur der Substratoberfläche nicht nur unter der Sättigungstemperatur des Wasserdampfes, sondern auch unter dem Gefrierpunkt des Wassers. Das bedeutet, dass das kritische Eigenvolumen des Tropfens, ausgedrückt über den kritischen Tropfenradius (siehe Gl. (2.4)), kleiner als das maximale Tropfenvolumen wird und von dem Unterkühlungsgrad abhängt.

Masse und Massenstrom des Kondensates für variierende Substratoberflächenstruktur

Die hydrophobe Lotusstruktur lässt sich mit einer Oberfläche mit einer Mikrorauigkeit vergleichen. Beim klassischen Lotus-Effekt[®] ist die Keimbildungs- und die Tropfenwachstumsphase nicht berücksichtigt und die Temperatur der Lotusoberfläche liegt oberhalb der Sättigungstemperatur. Wie schon im Kapitel 2.3.5 erklärt wurde, kann aufgrund kleiner Kontaktfläche und damit Adhäsionskraft zwischen Flüssigkeit und Substratoberfläche der vollständig ausgebildete Tropfen auf solchen Oberflächen eine Abrollbewegung ausführen.

Wenn die Temperatur des Versuchskörpers mit angeklebter Lotusschicht mit einem ausreichenden Abrollwinkel unterhalb der Erstarrungstemperatur liegt, kommt es zunächst zur Kondensation und zum Tropfenzuwachs und dann zur Tropfenerstarrung. Aus der Theorie des Kondensationsprozesses folgt, dass die Tropfendichte bzw. Keimstellenverteilung mit Zunahme der Unregelmäßigkeit der Oberflächenstruktur steigt. Die Keime entstehen in den Mikrovertiefungen der Lotusstruktur und bilden die Tropfen, welche nach Erreichen eines kritischen Radius erstarren. Die Kontaktfläche der wachsenden Tropfen mit der gekühlten Oberfläche wird größer gegenüber einem ausgebildeten z. B. aus einem Tropfengenerator erzeugten Tropfen, was erheblich den übertragenden Wärmestrom zwischen dem flüssigen Wasser und dem Versuchskörper erhöht. Eine schematische Darstellung des Wassertropfens auf der hydrophoben Lotusstruktur zeigt Abbildung 5.31.

Der Benetzungswinkel Θ der verwendeten Substratoberfläche ist $\geq 160^\circ$.

Der Wassertropfen erstarrt nach Erreichung des kritischen Eigenvolumens mit einem bestimmten kritischen Radius.

Der in Abbildung 5.32 dargestellte zeitliche Verlauf des Massenstroms des ausfallenden Wassers ist für die Lotusoberfläche in den ersten 3 bis 4 Minuten des Experimentes, also bis zum Erreichen des ersten lokalen Maximums, höher als für

5.4 Variierende Substratoberflächenparameter

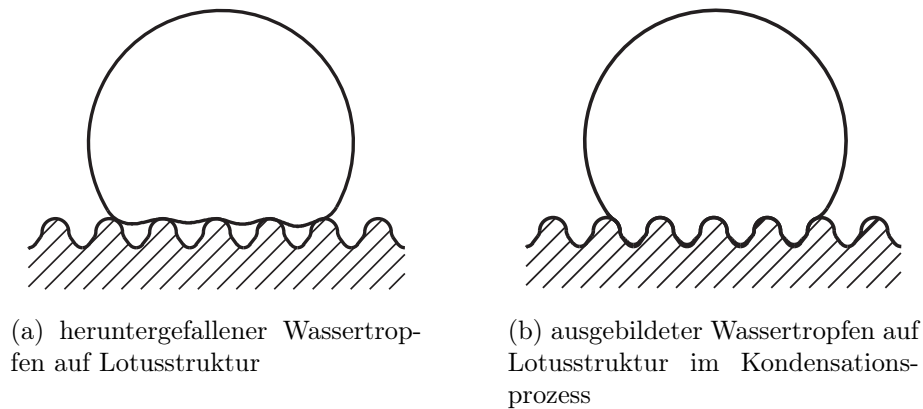


Abbildung 5.31: Geometrie des Wassertropfens auf einer Lotusoberfläche

das polierte Rohr.

Aufgrund besserer Wärmeübertragung (Flüssigkeit-Versuchskörper) erstarren die Wassertropfen schneller und bilden eine isolierende Reifschicht, welche den weiteren Kondensationsprozess hemmt. Wenn der Verlauf abnimmt und das Minimum erreicht, findet kein Verdichtungsprozess statt.

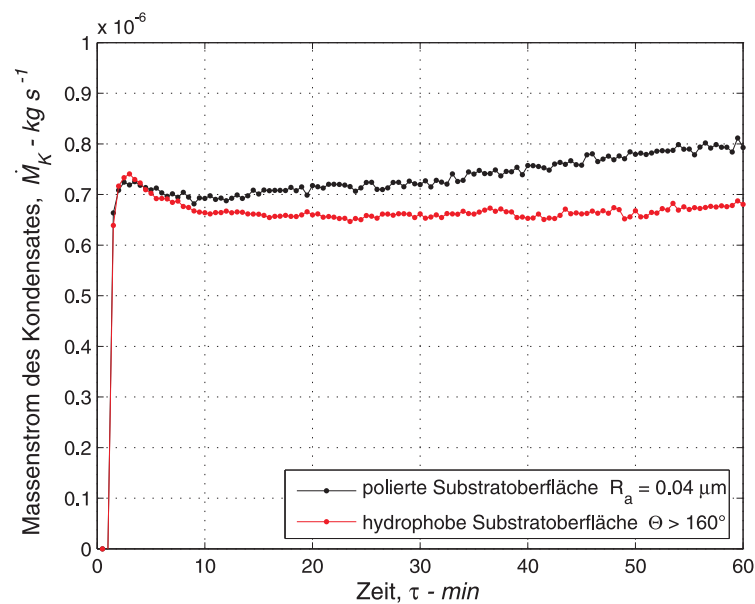


Abbildung 5.32: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Substratoberflächenstruktur

Es bilden und entwickeln sich auf erstarrten Wassertropfen früher als auf einer glatten Oberfläche die Eissäulen. Die poröse Reifschicht ist nicht von oben mit dem Wasserfilm bedeckt, welcher den Verdichtungsprozess bewirkt. Erst in einer späteren Phase, wenn die Verdichtung die Reifstruktur einsetzt, ändert sich der

5.4 Variierende Substratoberflächenparameter

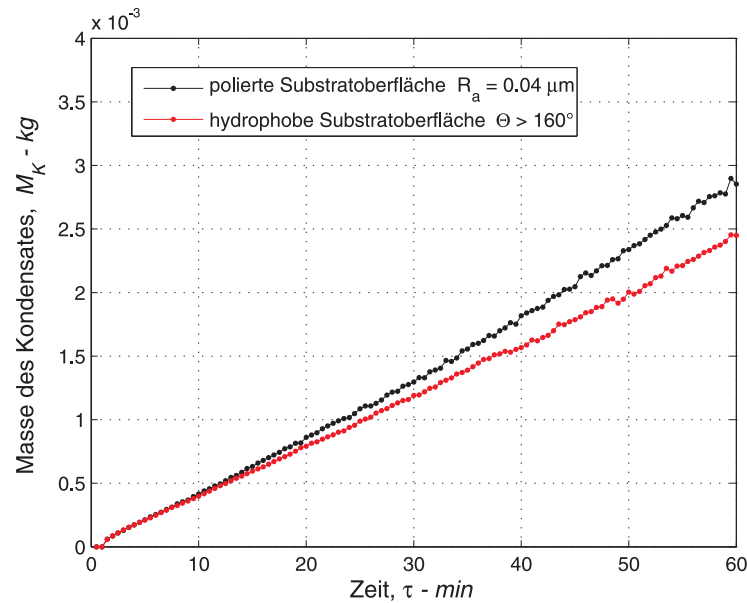


Abbildung 5.33: Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Substratoberflächenstruktur

Massenstrom des Kondensates über der Zeit nur wenig und am Ende des Versuchs steigt er wieder leicht an.

In Abbildung 5.33 ist der Verlauf der Masse des Kondensates dargestellt. Ähnlich wie bei einigen anderen Versuchsparametern lässt sich der Verlauf mit einer linearen Abhängigkeit beschreiben.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die hydrophobe Lotusoberfläche im Vergleich zum polierten Kupferrohr für gleiche Luftparameter durch höhere Isolationswirkung den Kondensatmassenstrom reduziert.

Gesamtwärmestrom für variierende Substratoberflächenstruktur

In Abbildung 5.34 wurde der Gesamtwärmestromverlauf aufgetragen. Es lässt sich feststellen, dass dieser Verlauf von dem latenten Anteil des Gesamtwärmestroms, welcher durch die Masse des Kondensates beeinflusst wird (siehe Gl. 4.8), abhängt. Die Isolationswirkung der entstehenden Reifstruktur begrenzt den Kondensationsprozess und reduziert die Wärmeleitung in der porösen Schicht. Der Verdichtungsprozess ist durch den geringeren Massenstrom des ausfallenden Wassers herabgesetzt und es nimmt schließlich, durch die Erhöhung der äußeren Reifschichttemperatur, der fühlbare Wärmestrom ab.

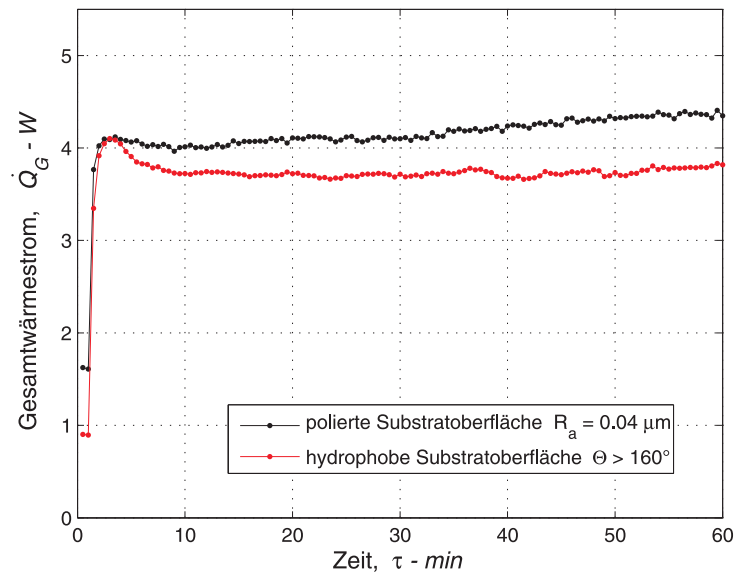


Abbildung 5.34: Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Substratoberflächenstruktur

Reifvolumen, Reifwachstumsgeschwindigkeit und mittlere Reifdichte für variierende Substratoberflächenstruktur

Der zeitliche Reifvolumenverlauf wird in Abbildung 5.35 präsentiert. Der Zuwachs der Reifdicke auf der Lotusstruktur ist schneller als auf dem Kupferrohr und die entstehende Reifstruktur besitzt eine höhere Porosität.

Der zeitliche Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit (siehe Abb. 5.36) erreicht für die hydrophobe Lotusstruktur höhere Werte, und dementsprechend wird die Isolationswirkung verstärkt und der übertragene Wärmestrom reduziert.

Die in der graphischen Darstellung gezeigte mittlere Reifdichte (Abb. 5.37) für die Lotusstruktur hat einen zeitlich flacheren Verlauf und erreicht niedrigere Werte im Vergleich zur Reifdichte auf dem polierten Versuchskörper.

Auf die Isolationswirkung haben auch die Krümmung des Rohres, also der lokale Abrollwinkel, die Luftparameter und der Unterkühlungsgrad einen bedeutenden Einfluss.

5.4 Variierende Substratoberflächenparameter

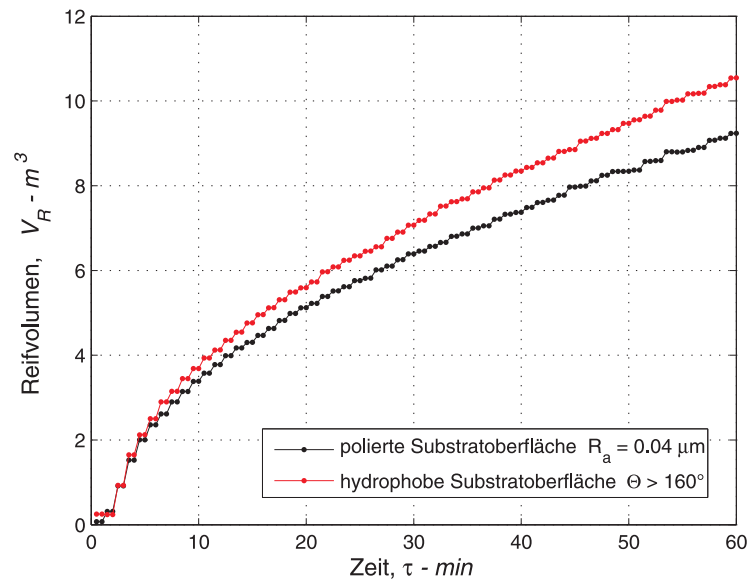


Abbildung 5.35: Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Substratoberflächenstruktur

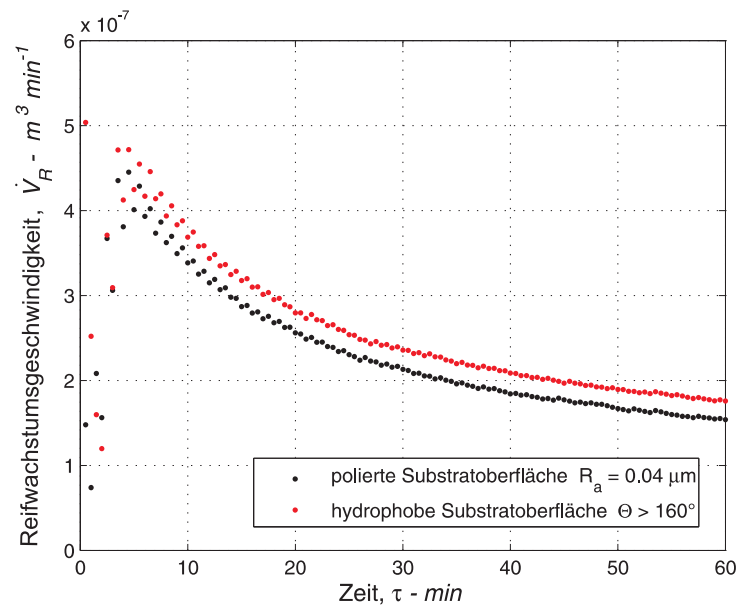


Abbildung 5.36: Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Substratoberflächenstruktur

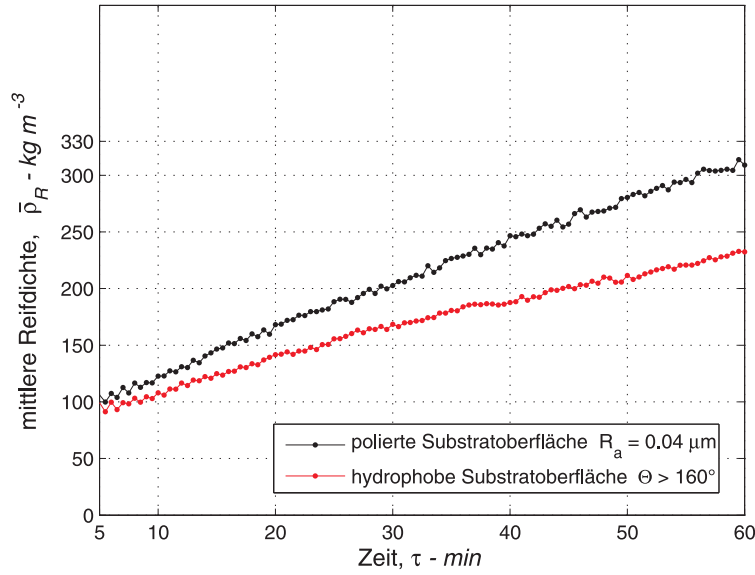


Abbildung 5.37: Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Substratoberflächenstruktur

5.4.3 Variierende Substratoberflächenrauheit

Die gekühlten Oberflächen weisen eine unregelmäßige Struktur auf. Die Unregelmäßigkeit, ausgedrückt mit der Rauheit der Oberfläche R_a , kann eine konkave, konvexe oder eine stufige Geometrie abbilden, welche den kritischen Radius und die kritische freie Enthalpie des Keimbildungsprozesses über die Werte der Benetzungswinkelfunktion beeinflusst.

Die größere Wahrscheinlichkeit für einen Kondensationsprozess herrscht auf konkaven Oberflächen vor, weil dort die kritische freie Energie $\Delta G_{(h)ij}^*$ der Keimbildung und die Benetzungswinkelfunktion f (siehe Abb. 2.3 und 2.4) im Vergleich zur konvexen oder ebenen Strukturen die geringsten Werte erreichen.

In die experimentellen Untersuchungen wurden zwei weitere Versuchskörper mit den Rauheiten $R_a = 1.89 \mu m$ und $R_a = 5.19 \mu m$ aufgenommen und die Ergebnisse mit dem glatten polierten Rohr verglichen.

Die anderen Parameter wurden konstant gehalten (Tabelle 3.1).

Masse und Massenstrom des Kondensates für variierende Substratoberflächenrauheit

Der zeitliche Verlauf des Massenstroms des Kondensates ist in Abbildung 5.38 dargestellt.

5.4 Variierende Substratoberflächenparameter

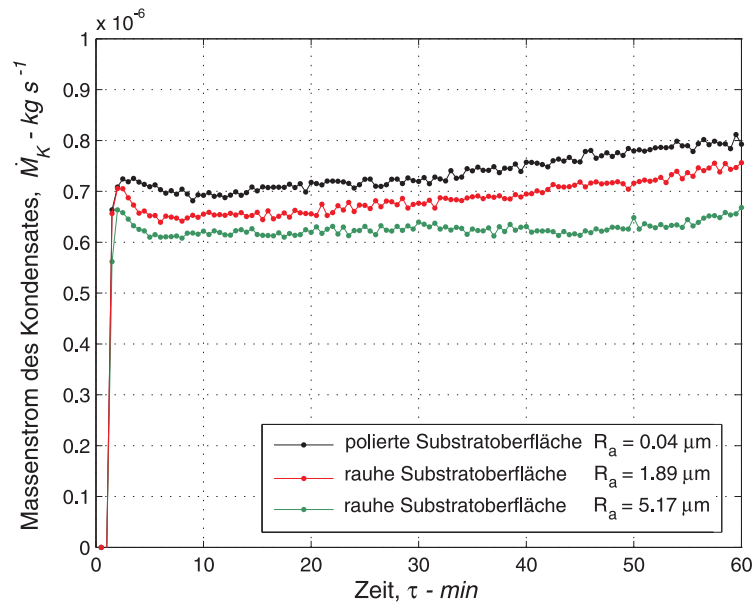


Abbildung 5.38: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Substratoberflächenrauheit

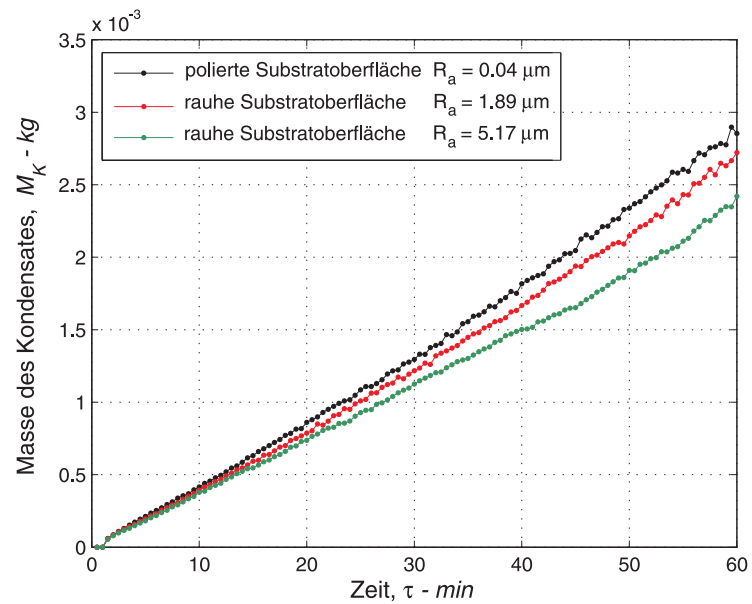


Abbildung 5.39: Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Substratoberflächenrauheit

5.4 Variierende Substratoberflächenparameter

Die Versuche zeigen, dass die beiden Verläufe für die rauhen Strukturen unterhalb des glatten Rohres liegen. Dies lässt sich mit dem Einfluss der kritischen freien Energie auf die konkave Struktur der Substratoberfläche in der Keimbildungsphase erklären. Je früher die unterkühlten Wassertropfen erstarren, desto höhere Porosität erreicht die Reifstruktur.

Es ist die Tendenz zu beobachten, dass die steigende Rauheit eine Abnahme des Massenstroms ausfallenden Wassers bewirkt. Die in der Abbildung 5.39 gezeigten Verläufe der Masse des Kondensates steigen mit der Abnahme der Rauheit.

Gesamtwärmestrom für variierende Substratoberflächenrauheit

Der Gesamtwärmestromverlauf ist in Abbildung 5.40 gezeigt. Mit steigender Rauheit nimmt der Gesamtwärmestrom ab und zugleich weist die Reifstruktur eine höhere Isolationswirkung auf. Die Verläufe der Gesamtwärmeströme sind vom Massenstrom des Kondensates abhängig.

In der Kältetechnik führen die bereifenden Oberflächen der Wärmeübertrager zur Verringerung des Wärmestroms, also zur Erhöhung der Betriebskosten der Kälteanlage. Der Einfluss der Rauheit der wärmeübertragenden Oberflächen verstärkt noch diesen Effekt. Die Auswahl der entsprechenden Struktur der Wärmeübertrageroberflächen sollte in der Projektphase der Kälteanlage als eine der Einflussfaktoren berücksichtigt werden.

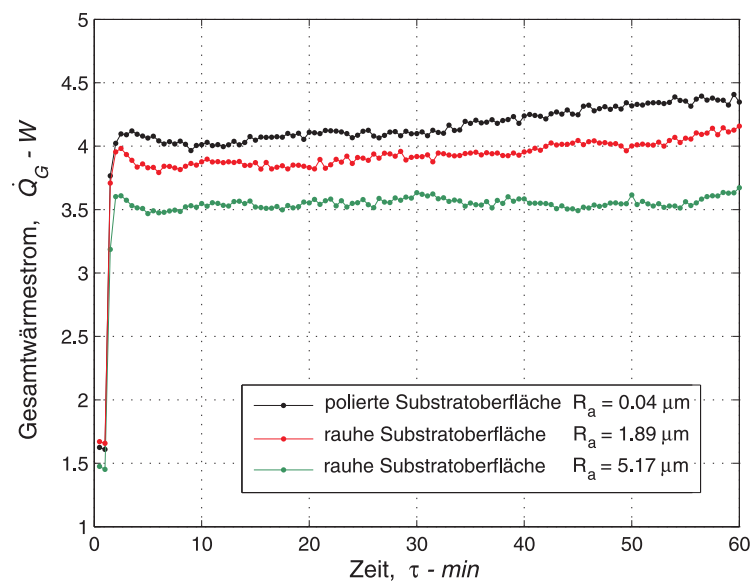


Abbildung 5.40: Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Substratoberflächenrauheit

Reifvolumen, Reifwachstumsgeschwindigkeit und mittlere Reifdichte für variierende Substratoberflächenrauigkeit

Der in der Abbildung 5.41 dargestellte zeitliche Verlauf des Reifvolumens steigt mit höheren Rauheiten.

Der zeitliche Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit ist in Abbildung 5.42 dargestellt. Mit der Abnahme der kritischen Enthalpie in der Keimbildungsphase steigt die Nukleationsrate, also die Geschwindigkeit der heterogenen Nukleation. Mit Erhöhung der Oberflächenrauheit überwiegt der Verdickungsmechanismus im Prozess der Reifbildung.

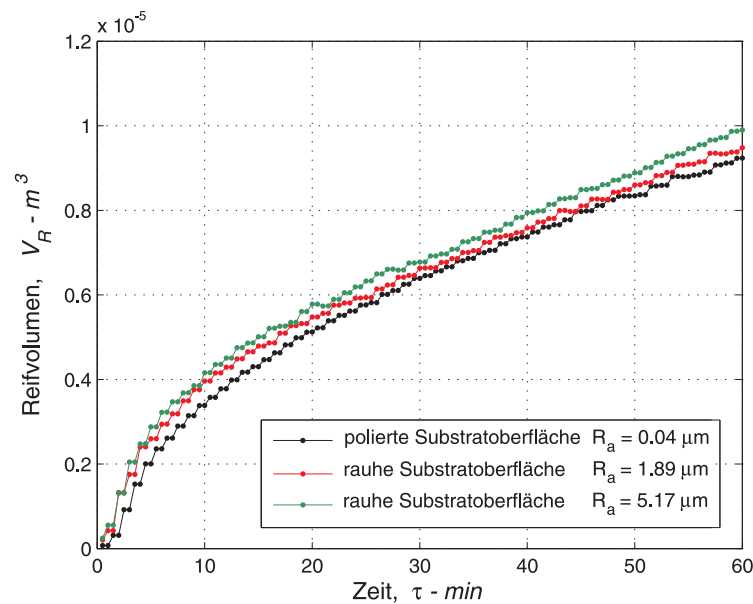


Abbildung 5.41: Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Substratoberflächenrauheit

Die Abbildung 5.43 zeigt die zeitlichen Verläufe der mittleren Reifdichte. Die mittlere Reifdichte nimmt für steigende Rauheit ab, da die Masse für größere Rauheiten ab- und das Volumen zunimmt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die auf gekühlten hydrophilen Substratoberflächen mit größeren Rauheiten entstehende Reifschicht, ähnlich wie auf der hydrophobe Lotusstruktur, eine höhere Porosität aufweist, die die Wärmeleitung stark reduziert.

5.4 Variierende Substratoberflächenparameter

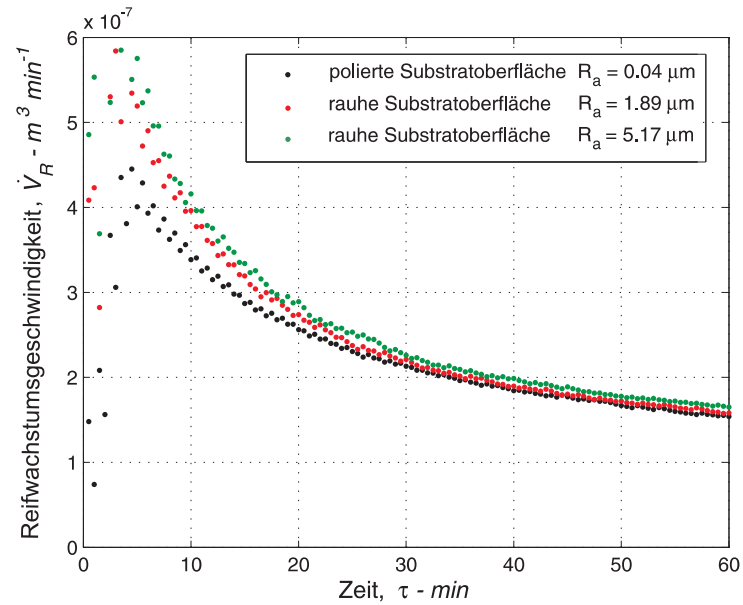


Abbildung 5.42: Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Substratoberflächenrauheit

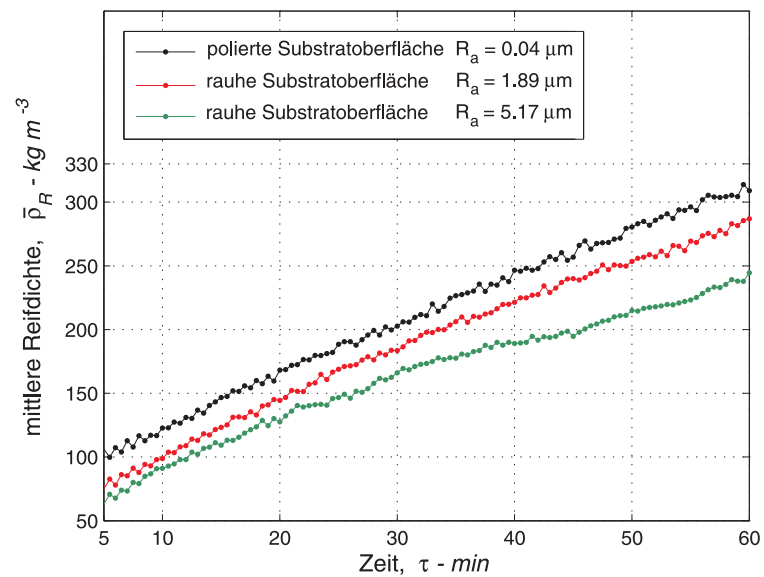


Abbildung 5.43: Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Substratoberflächenrauheit

5.5 Geometrie des Kanals

Das im Kanal quer eingebaute Rohr lässt sich wie ein Ausschnitt aus einem Rohrbündel betrachten. Unter der Annahme, dass bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten die an den Kanalwänden entstehende Grenzschicht keine Rolle spielt und die Deformierung des Luftgeschwindigkeitsprofils keinen Einfluss auf die Reifeigenschaften hat, lässt sich die Strömung der feuchten Luft im Kanal mit einem ähnlichen Durchfluss durch das Rohrbündel vergleichen (siehe Kapitel 3, Abb. 3.1).

Im Vergleich zu ebenen Platten sind die experimentellen Versuche mit einem im Kanal quer eingebauten Rohr von der Höhe des Kanals und dem Durchmesser des Rohres stark abhängig.

Im VDI-Wärmeatlas³¹ wird für eine Querströmung durch ein Rohrbündel ein Querteilungsverhältnis $a = s/d$ definiert. In diesem Faktor sind zwei geometrische Größen berücksichtigt, die Kanalhöhe s und der Durchmesser des Rohres d . In den Versuchen wird die Kanalhöhe variiert bei konstanter Re-Zahl am Eintritt zur Messstrecke. Die übrigen Luft- und Substratparameter werden ebenfalls konstant gehalten. Die verwendeten zusätzlichen Kanäle haben eine Höhe s von 34 mm und 44 mm.

Masse und Massenstrom des Kondensates für variierende Kanalhöhe

Die zeitlichen Verläufe des Massenstroms des ausfallenden Wassers sind in Abbildung 5.44 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass mit steigender Kanalhöhe der Massenstrom des Kondensates abnimmt. Die Luftgeschwindigkeit sinkt mit steigenden Kanalhöhen für die im Kanal konstante Reynoldszahl ($Re = 800$). Die Wirkung der Luftgeschwindigkeit auf die Intensität des Verdichtungs- und Verdickungsprozesses wird geringer.

Für einen unendlich hohen Kanal lassen sich im idealen Fall ähnliche Bedingungen wie für die freie Konvektion einstellen. Das Luftprofil wäre in diesem Fall nicht durch die Kanalwände von oben und von unten begrenzt, was eine Abnahme des Verdichtungs- und Verdickungsprozesses sowie allgemein die Reduktion des Massenstroms des kondensierenden Wasserdampfes bewirkt.

Die Verläufe der Masse des Kondensates wurden in Abbildung 5.45 gezeigt. Die Kondensatmasse sinkt mit größerer Kanalhöhe.

Ähnlich wie für andere Parameter lassen sich die Verläufe mit einer linearen Abhängigkeit beschreiben.

³¹Wärmeübertragung bei Queranströmung um einzelne Rohrreihen und durch Rohrbündel (Gg1)

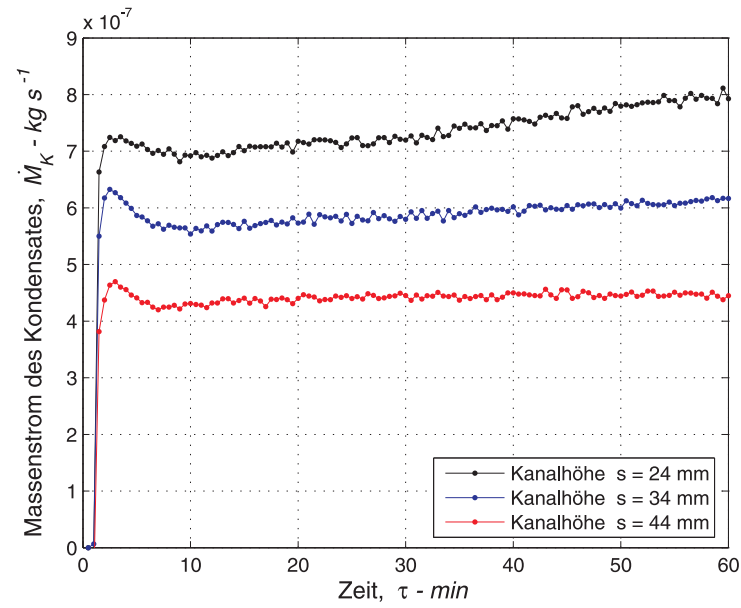


Abbildung 5.44: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierende Kanalhöhe

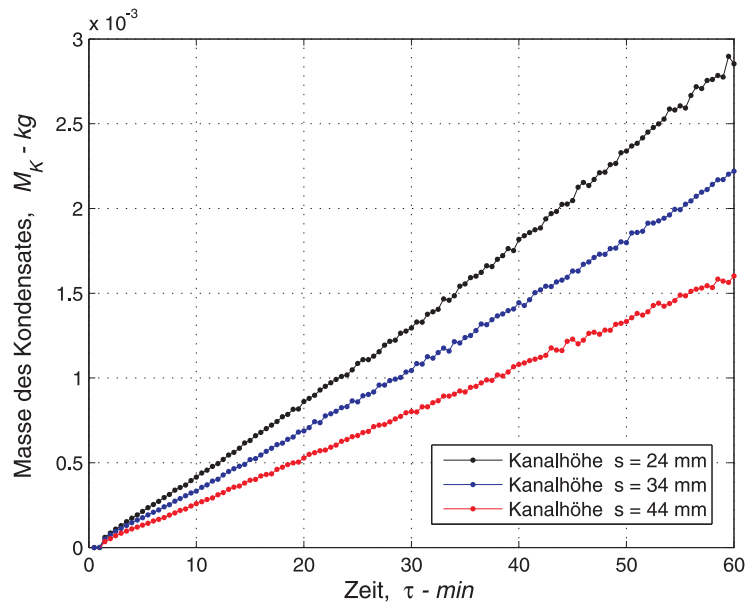


Abbildung 5.45: Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierende Kanalhöhe

Gesamtwärmestrom für variierende Kanalhöhe

Die Abnahme des Kondensatmassenstroms bei größerer Kanalhöhe reduziert den Einfluss des latenten Wärmestroms, wodurch im Endeffekt der Verdichtungsprozess abnimmt. Darüber hinaus beschränkt die poröse Reifstruktur mit geringerer Dichte, durch die Erhöhung der Reifschichttemperatur, den fühlbaren Anteil des Gesamtwärmestroms.

Die in Abbildung 5.46 dargestellten zeitlichen Verläufe des Gesamtwärmestroms nehmen für höhere Kanäle ab. Die Steigungen der Gesamtwärmestromkurven sind mit den Massenstromverläufen vergleichbar, was bedeutet, dass der Gesamtwärmestrom stark vom Massenstrom des Kondensates geprägt ist.

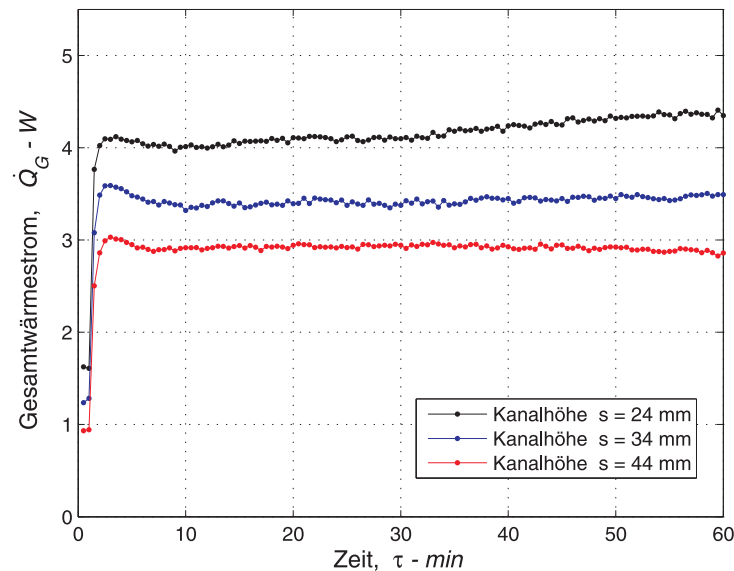


Abbildung 5.46: Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierende Kanalhöhe

Der Einfluss der verschiedenen Kanalhöhen ist mit dem Einfluss der Luftgeschwindigkeit vergleichbar. Mit der Abnahme der Luftgeschwindigkeit nimmt der Massenstrom ausfallenden Wassers sowie der Gesamtwärmestrom ab.

Natürlich lässt sich die Zweckmäßigkeit der Versuche mit verschiedenen Kanalhöhen hinterfragen. Jedoch benötigt man um die Korrelationsgleichungen herzuleiten eine komplette Parameterstudie, in der der Einfluss von allen möglichen variierenden Parametern auf die korrelierten Größen geprüft und physikalisch begründet wird.

Reifvolumen, Reifwachstumsgeschwindigkeit und mittlere Reifdichte für variierende Kanalhöhe

Der Reifvolumenverlauf (Abb. 5.47) nimmt mit der Zunahme der Kanalhöhe ab. Diese Erscheinung lässt sich ebenfalls mit der Abnahme der Luftgeschwindigkeit, also der konvektiven Wärme- und Stoffübertragung erklären. Im diesen Fall spielt der Einfluss der oberen und unteren Kanalwände auf das Luftgeschwindigkeitsprofil eine wichtige Rolle. Für niedrigere Kanäle steigen der Widerstand der Luftdurchströmung und die Intensität des Wärme- und Stoffübertragungsprozesses, was zur Erhöhung des Reifvolumens führt.

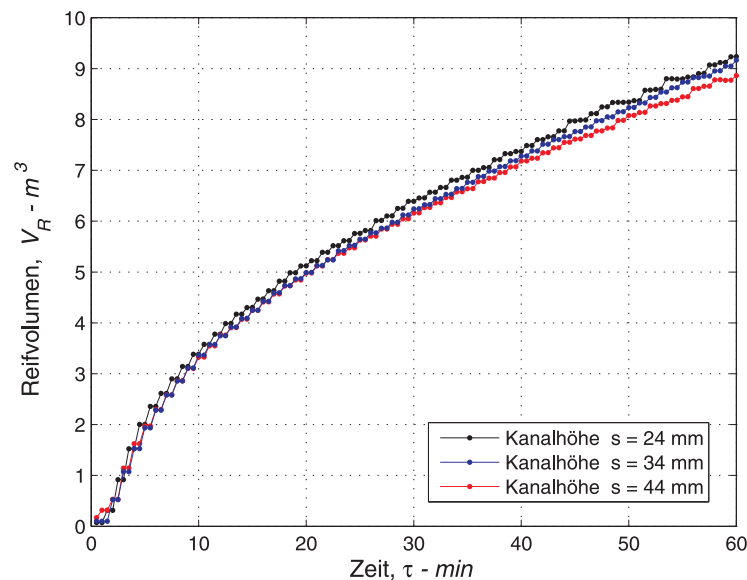


Abbildung 5.47: Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierende Kanalhöhe

Die Reifwachstumsgeschwindigkeit für verschiedene Kanalhöhen steigt mit abnehmender Höhe des Kanals. Darauf hat der Massenstrom des Kondensates bedeutenden Einfluss, da für kleineren Massenstrom der Zuwachs des Reifvolumens ebenfalls geringer ausfällt. Diese Abhängigkeit ist in Abbildung 5.48 dargestellt.

In Abbildung 5.49 ist zu erkennen dass die mittlere Reifdichte mit der Zunahme der Kanalhöhe abnimmt.

Wie zu erwarten, verringert die Zunahme der Kanalhöhe für konstante Reynoldszahl, trotz der Erhöhung des Massenstroms der feuchten Luft, die Luftgeschwindigkeit, und somit den dynamischen Druck. Daher wird der Verdichtungsprozess der porösen Reifstruktur vermindert.

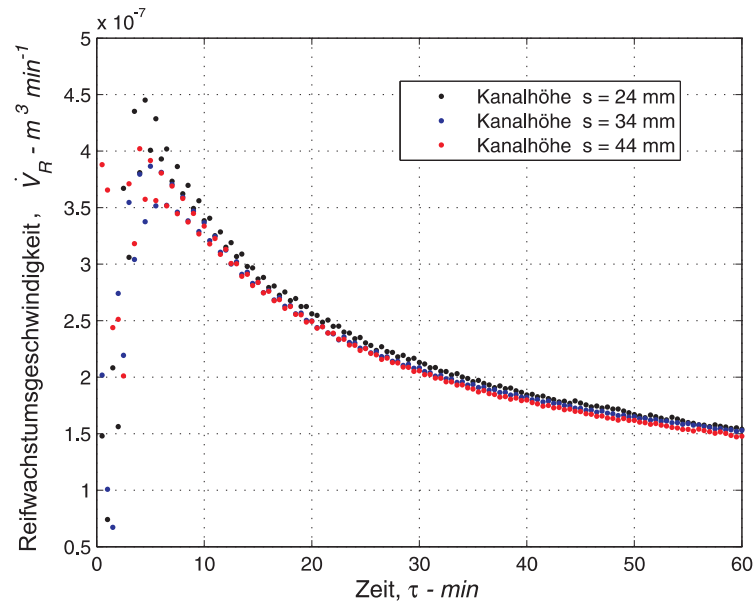


Abbildung 5.48: Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierende Kanalhöhe

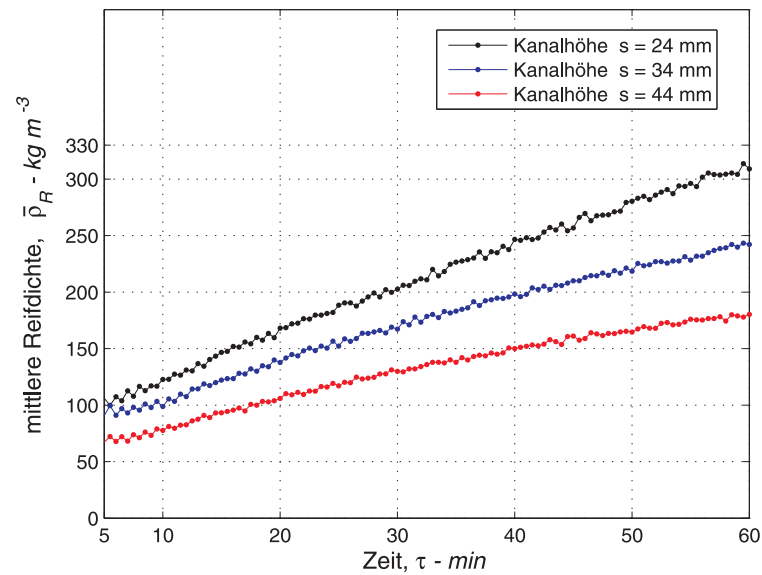


Abbildung 5.49: Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierende Kanalhöhe

5.6 Geometrie des Rohres

In diesem Abschnitt wird der Einfluss des Rohrdurchmessers auf die wichtigsten Reifeigenschaften dargestellt.

Wie schon zuvor erwähnt, wird um die Korrelationsgleichungen herzuleiten eine vollständige Parameterstudie der Einflussgrößen durchgeführt.

Das Querteilungsverhältnis $a = s/d$ berücksichtigt auch den Rohrdurchmesser d . Deswegen ist es wichtig und nötig, den Einfluss dieser Größe zu untersuchen, um ihn später in den Korrelationsgleichungen berücksichtigen zu können.

Das Rohr mit größerem Durchmesser $d = 18 \text{ mm}$ wird im Kanal mit der Höhe $s = 44 \text{ mm}$ eingebaut. Die anderen Luft- und Substratoberflächenparameter werden konstant gehalten. Die letzten Untersuchungen des Einflusses des Rohrdurchmessers auf die Reifstruktur sind nur für die allgemeine Charakteristik der Reifeigenschaften für die spätere Herleitung der Korrelationsgleichungen durchgeführt worden.

Um die experimentellen Untersuchungen zu vergleichen, wird das Querteilungsverhältnis a als Vergleichsfaktor genommen. Für die Standardparameter beträgt $a = 1.6$ und für das Rohr mit größerem Durchmesser und den höheren Kanal entsprechend $a = 2.9$.

Masse und Massenstrom des Kondensates für variierenden Rohrdurchmesser

Die zeitlichen Verläufe des Massenstroms und der Masse des ausfallenden Wassers sind in Abbildungen 5.50 und 5.51 gezeigt. Aus den Abbildungen des zeitlichen Verlaufs des Massenstroms ausfallenden Wassers und der Kondensatmasse ist zu erkennen, dass mit steigendem Querteilungsverhältnis die Werte abnehmen. Die Erscheinung der Kondensatabnahme lässt sich mit dem Einfluss des größeren freien Raums zwischen dem gekühlten Rohr und den oberen und unteren Kanalwänden erklären.

Eine reduzierte Luftgeschwindigkeit im Kanal verringert den Einfluss des Verdichtungsprozesses.

5.6 Geometrie des Rohres

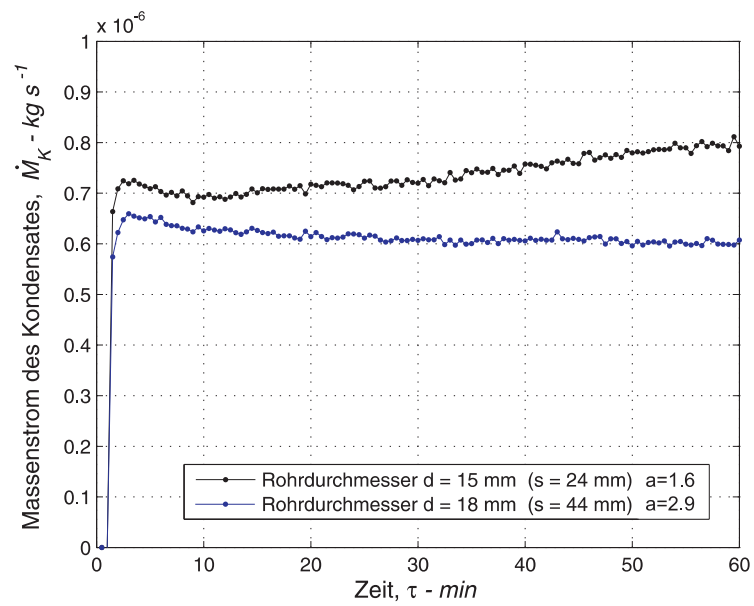


Abbildung 5.50: Zeitlicher Verlauf des Massenstroms des Kondensates für variierenden Rohrdurchmesser

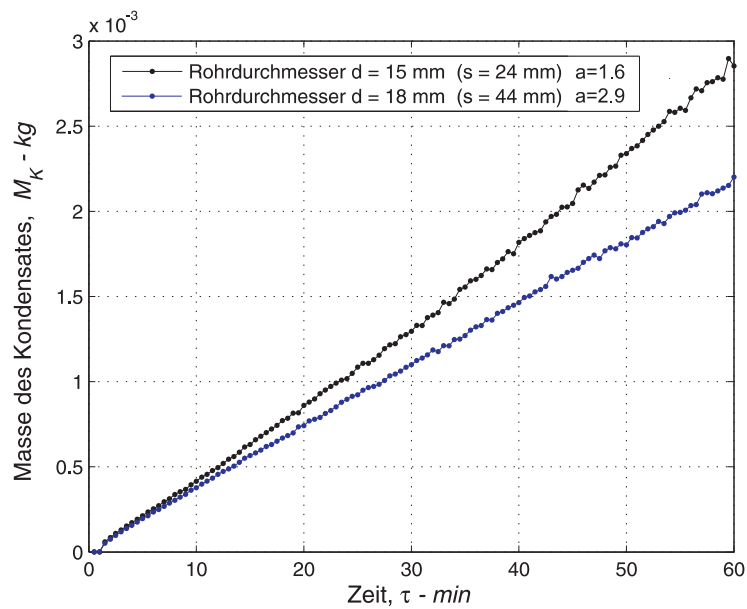


Abbildung 5.51: Zeitlicher Verlauf der Masse des Kondensates für variierenden Rohrdurchmesser

Gesamtwärmestrom für variierenden Rohrdurchmesser

Der Gesamtwärmestrom, welcher hauptsächlich vom Massenstrom des Kondensates abhängt, nimmt für steigendes Querteilungsverhältnis ab. Im Endeffekt weist für ein höheres Querteilungsverhältnis die entstehende poröse Reifschicht eine größere Isolationswirkung auf und beschränkt den Kondensationsprozess. Höhere Temperatur der äußeren Reifschicht und ihre Isolationswirkung verringert den fühlbaren Wärmestrom. Die Verläufe sind in Abbildung 5.52 dargestellt.

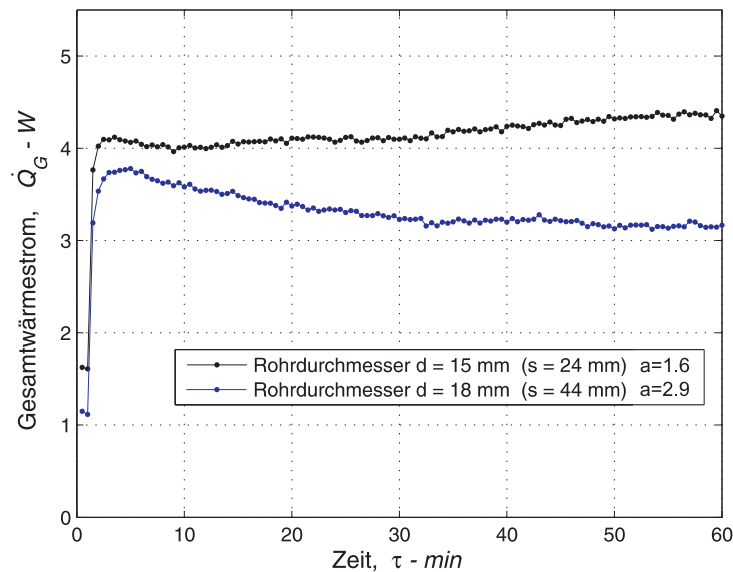


Abbildung 5.52: Zeitlicher Verlauf des Gesamtwärmestroms für variierenden Rohrdurchmesser

Reifvolumen, Reifwachstumsgeschwindigkeit und mittlere Reifdichte für variierenden Rohrdurchmesser

Für geringeren Massenstrom des Kondensates nimmt das Reifvolumen ab. Ein größeres Querteilungsverhältnis verringert die Luftgeschwindigkeit und dementsprechend verlangsamen sich die Verdichtungs- und Verdickungsprozesse.

In Abbildung 5.53 ist der zeitliche Verlauf des Reifvolumens dargestellt, welcher für das größere Querteilungsverhältnis abnimmt.

Für einen kleineren Massenstrom nimmt auch die Reifwachstumsgeschwindigkeit ab. In Abbildung 5.54 ist zu erkennen, dass der Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit unterhalb des Standardverlaufs liegt.

5.6 Geometrie des Rohres

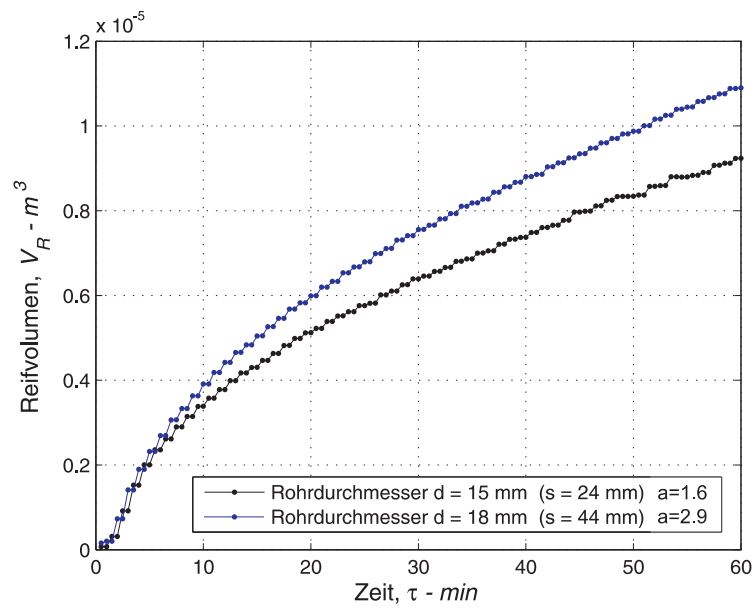


Abbildung 5.53: Zeitlicher Verlauf des Reifvolumens für variierenden Rohrdurchmesser.

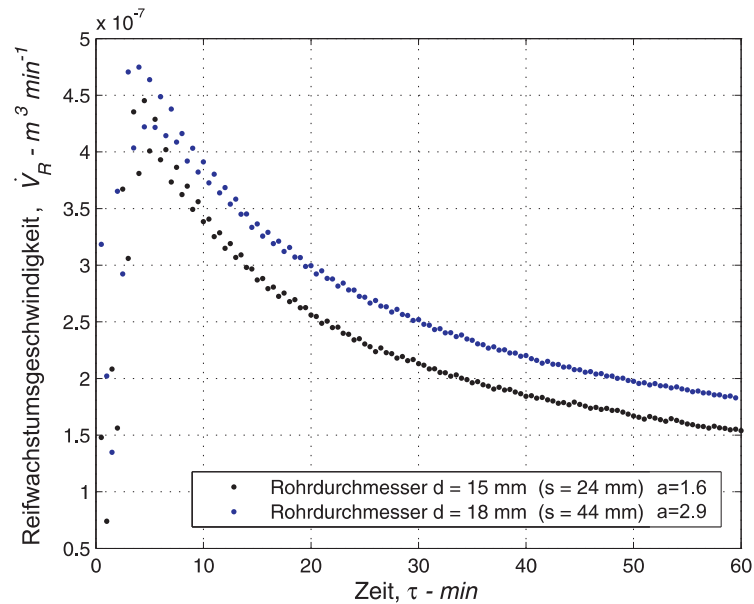


Abbildung 5.54: Zeitlicher Verlauf der Reifwachstumsgeschwindigkeit für variierenden Rohrdurchmesser.

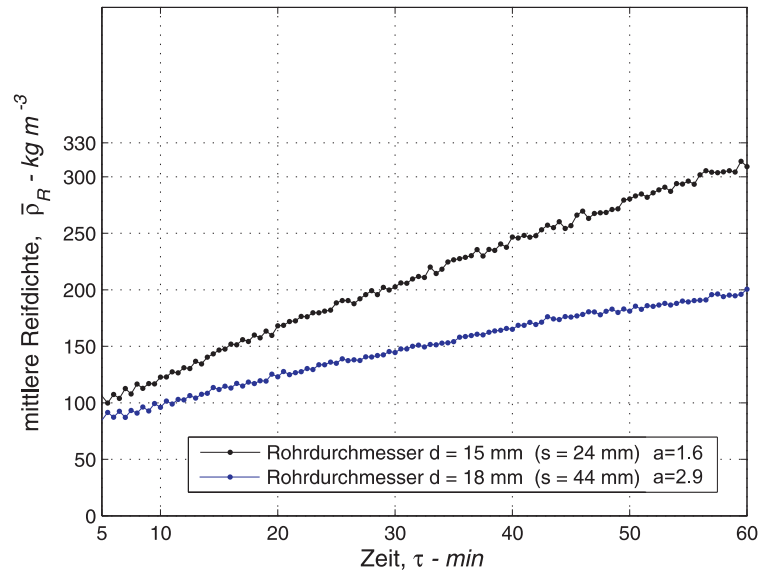


Abbildung 5.55: Zeitlicher Verlauf der mittleren Reifdichte für variierenden Rohrdurchmesser.

Die mittlere Reifdichte sinkt mit dem zunehmenden Querteilungsverhältnis. Die Verläufe sind in Abbildung 5.55 dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der mittlere Reifdichteverlauf eine höhere Isolationswirkung der entstehenden Reifschicht für größeres Querteilungsverhältnis bestätigt.

Für höhere Kanäle nimmt die Luftgeschwindigkeit bei konstanter Reynoldszahl trotz steigenden Massenstroms der feuchten Luft ab und reduziert die Wirkung des dynamischen Druckes auf den Verdichtungsprozess.

Das zunehmende Querteilungsverhältnis vermindert den Verdichtungsprozess und verstärkt die Isolationswirkung.

Kapitel 6

Ableitung von Korrelationsgleichungen und deren Validierung

In diesem Kapitel werden Korrelationsgleichungen für die wichtigsten Parameter der Reifstruktur hergeleitet.

Als die zentrale Größe, wie schon zuvor erläutert, ist die mittlere Reifdichte definiert, welche die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit ermöglicht.

In dieser Arbeit werden zwei Möglichkeiten der Reifdichteberechnung vorgeschlagen:

- Direkte Berechnung der mittleren Reifdichte aus der gegebenen Korrelationsgleichung als Funktion von allen variierenden Parametern (siehe Kapitel 3)

oder

- indirekte Berechnung der Masse des ausfallenden Wassers, welche der Reifmasse entspricht, aus der gegebenen Korrelationsgleichung und danach erst die Ermittlung der mittleren Reifdichte aus der Gleichung der Dichte (4.11) für gegebenes oder gemessenes Reifvolumen.

Korrelationsgleichungen, welche auch ein mathematisches Modell der Reifbildung darstellen, finden hauptsächlich praktische industrielle Anwendungen. Es lässt sich schnell die Zielgröße aus solchen Gleichungen berechnen oder, mit Hilfe der graphischen Darstellung, diese physikalische Größe ablesen.

In den nächsten Abschnitten werden die Korrelationsgleichungen für die mittlere Reifdichte $\bar{\rho}_R$ und die Masse des Kondensates \dot{M}_K hergeleitet, besprochen und dargestellt.

6.1 Methodische Ansätze zur Erstellung der Korrelationsgleichungen

Die Korrelationsgleichungen stellen einen mathematischen Zusammenhang zwischen den direkt gemessenen variablen physikalischen Größen und dem gesuchten Wert dar. Die Korrelationsrechnung reduziert die N-dimensionale Matrix der gemessenen und berechneten Einflussgrößen zu einer drei- oder zwei-dimensionalen Matrix.

Beispielsweise wird die in der Thermodynamik angewandte Wärmekapazität des idealen Gases bei konstantem Druck, welche als Funktion der Temperatur gegeben ist, als eine Potenzreihe ausgedrückt. Die Virialgleichungen, welche die Abweichung eines idealen Gases von einem realen Gas berücksichtigen, gehören auch zur Gruppe der Korrelationsgleichungen.

In beiden Fällen werden als die Verbindungsgrößen der direkt gemessenen und der berechneten Größe experimentell bestätigte phänomenologische Koeffizienten verwendet.

Es gibt zwei Wege die Korrelationsgleichungen für die Reifparameter herzuleiten:

- Die erste Methode basiert auf der Ähnlichkeitstheorie und einer dimensionslosen Kennzahl, welche den Einfluss aller variierenden Parameter berücksichtigt.
- Die zweite Methode basiert auf bestehenden dimensionslosen Kennzahlen, welche unter Berücksichtigung der physikalischen Aspekte des Phänomens die physikalische Abhängigkeit beschreiben.

In dieser Arbeit wurde die zweite Methode der Korrelationsrechnung verwendet. Unter Verwendung der bestehenden dimensionslosen Kennzahlen und der Methode der kleinsten Quadrate werden die Korrelationsgleichungen hergeleitet und ihre Abweichung von den experimentellen Ergebnissen minimiert.

Ein Schema eines Rohrbündels mit den entsprechenden gemessenen Parametern wird in Abbildung 6.1 gezeigt.

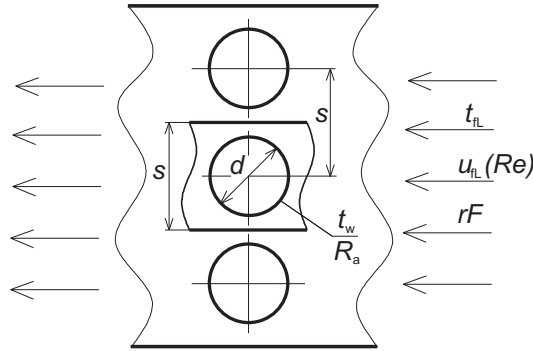


Abbildung 6.1: Ausschnitt der ersten Rohrreihe eines Rohrbündels mit gemessenen Einflussparametern

Die Korrelationsgleichungen sind für die erste Rohrreihe gültig. Die gemessenen Parameter am Eintritt des Rohrbündels sind konstant und liegen im Variationsbereich gemäß des Versuchsplans (siehe Tabelle 3.1).

Die variierten Parameter wurden, unter Verwendung bestehender dimensionsloser Kennzahlen, zu einer dimensionslosen Zahl reduziert. Die Luftgeschwindigkeit u_{fL} der im Kanal strömenden feuchten Luft und die Temperatur t_{fL} ist mit der modifizierten Reynoldszahl für eine Querströmung durch Rohrbündel ausgedrückt

$$\text{Re}^* = \frac{u_{fL} \cdot l_0}{\psi^* \cdot \nu}. \quad (6.1)$$

Im Vergleich zu der im VDI-Wärmeatlas für Querströmung durch Rohrbündel definierten Reynoldszahl ist die in den Korrelationsgleichungen angewandte dimensionslose Reynoldszahl modifiziert (Re^*).

Der Unterschied der modifizierten Reynoldszahl gegenüber der Standard Re- Zahl liegt in den Exponenten Z_1 , Z_2 , Z_3 und Z_4 , welche zu unbekannten Größen gehören und separat für beide Korrelationsgleichungen berechnet wurden.

Die Geschwindigkeit des Fluids u_{fL} wird am Eintritt zum Rohrbündel vor der Rohreihe im freien Querschnitt bestimmt. Die in der Gleichung berücksichtigte dimensionslose geometrische Größe l_0 repräsentiert die Überströmlänge des Einzelrohres

$$l_0 = \frac{\pi}{2} \cdot d^*. \quad (6.2)$$

Darüber hinaus ist der modifizierte Hohlraumanteil ψ^*

$$\psi^* = 1 - \left(\frac{\pi}{4 \cdot a^*} \right)^{Z_2} \quad (6.3)$$

vom modifizierten Querteilungsverhältnis a^* abhängig

$$a^* = \left(\frac{s^*}{d^*} \right)^{Z_1}. \quad (6.4)$$

Die Standardwerte des Rohrdurchmessers sowie der Kanalhöhe sind ebenfalls mit den Koeffizienten Z_3 und Z_4 modifiziert

$$s^* = s^{Z_4}, \quad d^* = d^{Z_3}. \quad (6.5)$$

Die kinematische Viskosität steigt mit der Zunahme der Temperatur und ist im Temperaturenbereich t_{fL} von 22 °C bis 28 °C mit der Gleichung³²

$$\nu(t) = 1.3495 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(0.0058303 \cdot t_{fL}) \quad (6.6)$$

für trockene Luft gegeben.

Die treibende Kraft des Wärme- und Stoffübertragungsprozesses während der Reifbildung ist mit dem Produkt der modifizierten dimensionslosen Stefanzzahl (Ste^*) und der relativen Feuchtigkeit rF ausgedrückt

³²die Werte der kinematischen Viskosität wurden im Temperaturbereich $t_{fL} \in \langle 22...28 \rangle$ °C korreliert. Quelle: *Thermophysical Properties of Matter Vol. 11: Viscosity*, Y.S. Touloukian, S.C. Saxena, and P. Hestermans IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0 – 306067020 – 8

6.1 Methodische Ansätze zur Erstellung der Korrelationsgleichungen

$$\text{Ste}^* \cdot rF = \frac{c_p(t) \cdot (T_{fL} - T_w)}{r_{lat}} \cdot rF. \quad (6.7)$$

In diesem Produkt werden die Parameter der feuchten Luft, die Temperatur t_{fL} und relative Feuchtigkeit rF sowie auch die Substratoberflächentemperatur t_w berücksichtigt.

Die Differenz zwischen der Luft- und Substratoberflächentemperatur wurde als die thermische treibende Kraft des Reifbildungsprozesses definiert.

Als letzter Parameter wird die Rauheit der Substratoberfläche R_a berücksichtigt. Für drei verschiedene Rauheiten wird ein Rauheitsfaktor R_f vorgeschlagen, welcher von R_a abhängig ist. Seine Werte werden für die entsprechenden Korrelationsgleichungen im nächsten Kapitel dargestellt.

Die dimensionslose Rd-Zahl, die aus der Reynolds-, Stefanzahl und relativer Feuchtigkeit besteht, wird als Ergebnis der Optimierung in folgender Form dargestellt:

$$\text{Rd} = \text{Re}^* \cdot \text{Ste}^* \cdot rF \cdot R_f^{-0.5} \cdot 10^{-2}. \quad (6.8)$$

Um eine Optimierung durchzuführen, muss eine Zielfunktion und ihre Optimierungsbedingungen definiert werden.

Jeder Verlauf der mittleren Reifdichte und der Masse des Kondensates (des Reifes) kann mit einer linearen Funktion abgebildet werden. Die Verläufe erreichen ihre maximalen Werte am Ende des einstündigen Versuchs. Die reduzierten Rd- Zahlen nehmen mit steigenden Werten der physikalischen Einflussgrößen im Bereich der Variation (siehe Tabelle 3.1) zu. Um eine ansteigende Reihe der Rd- Zahlen zu erreichen, wurden die Koeffizienten Z_1 , Z_2 , Z_3 und Z_4 eingeführt.

Infolgedessen wird als die Zielfunktion unter Erhaltung obigen Optimierungsbedingungen die Minimierung der Standardabweichung für jede Korrelationsgleichung angenommen.

Der Einfluss der Reibungs- und Trägheitskraft ist in der Reynoldszahl enthalten. Das Produkt der Stefanzahl und der relativen Feuchtigkeit beinhaltet den Einfluss der thermischen Parameter.

6.1.1 Korrelationsgleichung für die Masse des Kondensates

Die Masse des ausfallenden Wassers ist unter Verwendung der reduzierten Rd-Zahl korreliert. Wie bereits im vorigen Kapitel erklärt, erhält man eine reduzierte Rd-Zahl, welche mit der reduzierten Zeit und der Masse des Kondensates eine dreidimensionale Matrix bildet.

Unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate³³ und der Auswahl einer passenden Funktion, lässt sich die mathematische Abhängigkeit mit folgender Fläche darstellen (siehe Abbildung 6.2).

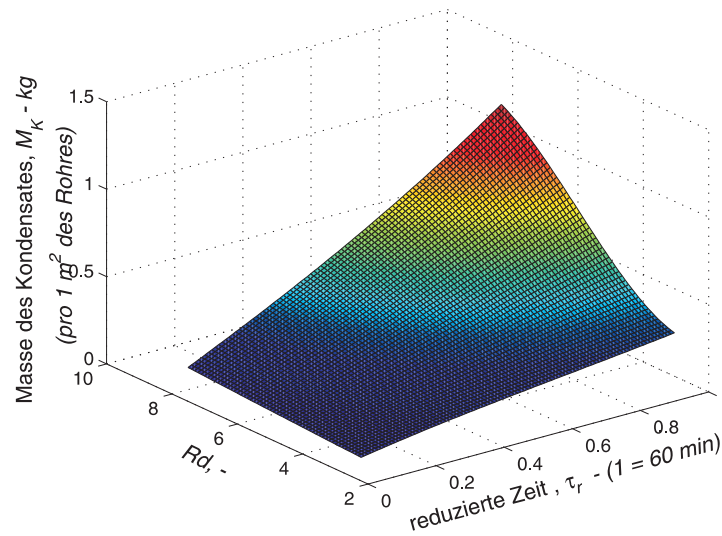


Abbildung 6.2: Masse des Kondensates als Funktion der reduzierten Rd- Zahl und der Zeit τ_r

Die Korrelationsgleichung für die Masse des Kondensates für 1 m² des gekühlten Rohres hat folgende Form:

$$M_K = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 A_{1+4i+j} \cdot \tau_r^i \cdot Rd^j. \quad (6.9)$$

³³diese Optimierung lässt sich in verschiedenen kommerziellen Programmen durchführen, z. B. Fortran[®] unter Verwendung IMSL[®] Numerical Libraries, Origin[®], Matlab[®], Python[®]

6.1 Methodische Ansätze zur Erstellung der Korrelationsgleichungen

Die Koeffizienten A sind in Tabelle 6.1 angegeben.

Tabelle 6.1: Koeffizienten A für die Korrelationsgleichung zur Berechnung der Masse des Kondensates

A_1	$-7.3815 \cdot 10^{-2}$	A_9	-1.3645
A_2	$3.6341 \cdot 10^{-2}$	A_{10}	$5.6702 \cdot 10^{-1}$
A_3	$-5.7313 \cdot 10^{-3}$	A_{11}	$-7.3196 \cdot 10^{-2}$
A_4	$3.0592 \cdot 10^{-4}$	A_{12}	$3.1016 \cdot 10^{-3}$
A_5	1.0013	A_{13}	1.1933
A_6	$-4.3049 \cdot 10^{-1}$	A_{14}	$-6.1079 \cdot 10^{-1}$
A_7	$8.7306 \cdot 10^{-2}$	A_{15}	$9.8721 \cdot 10^{-2}$
A_8	$-4.4694 \cdot 10^{-3}$	A_{16}	$-4.8919 \cdot 10^{-3}$

Der in der Rd- Zahl berücksichtigte Rauheitsfaktor wird mit einer parabolischen Gleichung (6.12) approximiert

$$R_f = 0.0016 \cdot R_a^2 + 0.0403 \cdot R_a + 0.998. \quad (6.10)$$

Tabelle 6.2: Koeffizienten R_f für die Korrelationsgleichung zur Berechnung der Masse des Kondensates

Rauheitsfaktor R_f , –	Rauheit R_a , μm
1.0	0.04
1.08	1.89
1.25	5.17

Die Werte der vier Exponenten Z_i für die Gleichung der Kondensatmasse sind in Tabelle 6.3 gegeben.

Tabelle 6.3: Exponenten Z_i für die Korrelationsgleichung zur Berechnung der Masse ausfallenden Wassers

Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
-0.09187	12.7	0.9091	0.6667

6.1 Methodische Ansätze zur Erstellung der Korrelationsgleichungen

Diese Gleichung ist gültig für die maximale Rd-Zahl von 8.4 und für den im experimentellen Teil der Arbeit gegebenen Bereich der Versuchsparameter (siehe Tabelle 3.1). Die Zeit in Gl. (6.9) ist durch die Versuchsdauer von einer Stunde entdimensioniert.

Unter Verwendung dieser Korrelationsgleichung lässt sich die Masse des Kondensates ermitteln. Diese Gleichung kann hauptsächlich in technischen Anwendungen der Kältetechnik hilfreich sein, in der die Bildung der Reifstruktur zu unerwünschten Effekten führt und die Isolationswirkung vergrößert.

Wie bereits angedeutet, bilden die Ergebnisse der Korrelationsgleichung in zwei Variablen, der Rd-Zahl und der reduzierten Zeit τ_r , eine dreidimensionale Matrix. Für die praktische Anwendung (Abb. 6.3) wird die Masse des ausfallenden Wassers mit den Isolinien repräsentiert.

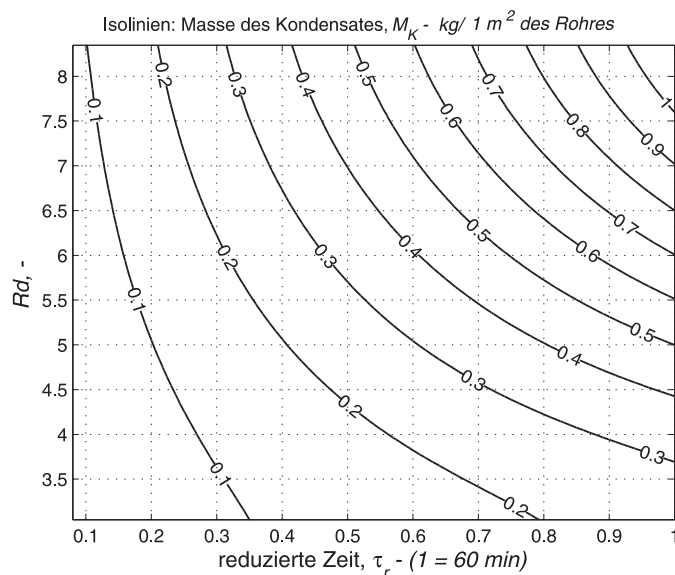


Abbildung 6.3: Masse des Kondensates als Funktion der reduzierten Rd-Zahl und der Zeit τ_r

Die Zweckmäßigkeit der Korrelationsgleichungen und ihrer graphischen Darstellungen zeigt sich im Vergleich zu komplizierten mathematischen CFD Modellen in einfacherer und schnellerer Handhabung.

Die Abweichung der Korrelationsgleichung für die Masse des ausfallenden Wassers ist kleiner als der Fehler der Messmethode in den experimentellen Versuchen. Die Abweichungen der Korrelationsrechnung δ_{Kor} für die entsprechenden Werte der Versuchsparameter sind in Tabelle 6.4 gegeben.

6.1 Methodische Ansätze zur Erstellung der Korrelationsgleichungen

Tabelle 6.4: Mittlere Standardabweichungen der Korrelationsgleichung für die Masse ausfallenden Wassers. STD - Standard - Parameter siehe Tabelle 3.1

Parameter	$rF = 30\%$	$rF = 40\%$	$rF = 50\%$	STD	$rF = 70\%$
%	± 1.2	± 1.2	± 4.2	± 3.0	± 3.2
Parameter	$rF = 80\%$	$Re_\infty = 700$	$Re_\infty = 900$	$Re_\infty = 1000$	$Re_\infty = 1100$
%	± 2.4	± 7.2	± 2.4	± 2.4	± 1.9
Parameter	$t_{fL} = 25^\circ C$	$t_{fL} = 28^\circ C$	$t_w = -7^\circ C$	$t_w = -13^\circ C$	$t_w = -16^\circ C$
%	± 4.4	± 4.7	± 2.6	± 5.9	± 3.2
Parameter	$R_a = 1.89\mu m$	$R_a = 5.17\mu m$	$s = 34mm$	$s = 44mm$	$d = 18mm$
%	± 1.0	± 2.2	± 6.1	± 3.4	± 2.3

Darüber hinaus ist die Streuung der Standardabweichung (Abb. 6.7) als Funktion der Masse ausfallenden Wassers pro $1 m^2$ des gekühlten Rohres graphisch dargestellt.

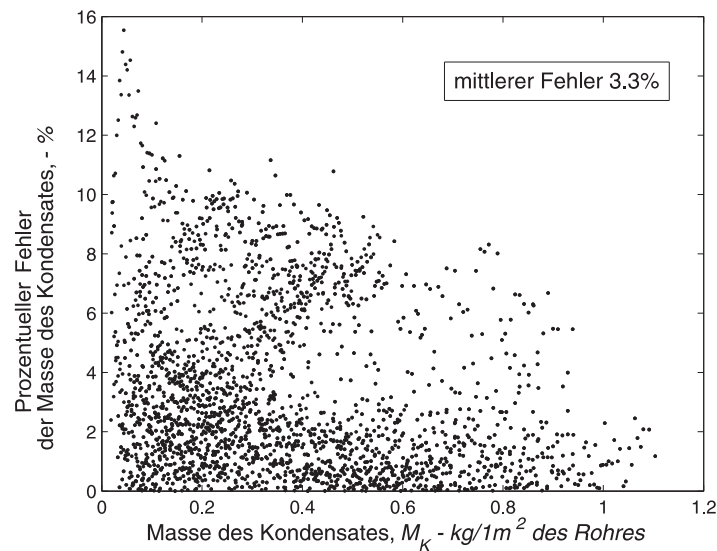


Abbildung 6.4: Standardabweichung der Korrelationsgleichung zur Berechnung der Masse des Kondensates

6.1.2 Korrelationsgleichung für die mittlere Reifdichte

Die direkte Berechnung der mittleren Reifdichte $\bar{\rho}_R$ ist aus der zweiten Korrelationsgleichung möglich. Die Korrelationsgleichung der mittleren Reifdichte, ähnlich wie die Gleichung der Masse des Kondensates, basiert auf der reduzierten Rd-Zahl, welche den Einfluss aller variierenden Parameter berücksichtigt.

Diese Gleichung wird unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate hergeleitet

$$\bar{\rho}_R = A_1 \cdot \text{Rd} \cdot \tau_r + A_2 \cdot \tau_r^2 \cdot \tanh(\text{Rd}) + A_3 \quad (6.11)$$

und stellt einen Zusammenhang zwischen der mittleren Reifdichte $\bar{\rho}_R$, der reduzierten Rd-Zahl und der reduzierten Zeit τ_r her.

Die drei Koeffizienten A sind in der Tabelle 6.5 angegeben.

Tabelle 6.5: Koeffizienten A für die Korrelationsgleichung der mittleren Reifdichte

A_1	$4.4437 \cdot 10^1$
A_2	$-4.7574 \cdot 10^1$
A_3	$9.1213 \cdot 10^1$

Die Rauheit in der Korrelationsgleichung für die mittlere Reifdichte wird, ähnlich wie für die Masse des ausfallenden Wassers, mit dem Rauheitsfaktor R_f ausgedrückt und mit einer parabolischen Funktion approximiert.

Tabelle 6.6: Koeffizienten R_f für die Korrelationsgleichung der mittleren Reifdichte

Rauheitsfaktor R_f , –	Rauheit R_a , μm
1.0	0.04
1.3	1.89
1.9	5.17

6.1 Methodische Ansätze zur Erstellung der Korrelationsgleichungen

$$R_f = 0.0040547 \cdot R_a^2 + 0.15432 \cdot R_a + 0.99383 \quad (6.12)$$

Die Exponenten Z_i für die Rd-Zahl der Korrelationsgleichung der mittleren Reifdichte sind in der Tabelle 6.7 angegeben.

Tabelle 6.7: Exponenten Z_i für die Korrelationsgleichung der mittleren Reifdichte

Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
0.4088	2.281	0.9414	0.89

Der Zusammenhang zwischen mittlerer Reifdichte, reduzierter Zeit und der Rd-Zahl kann mit einer Fläche dargestellt werden (Abb. 6.5).

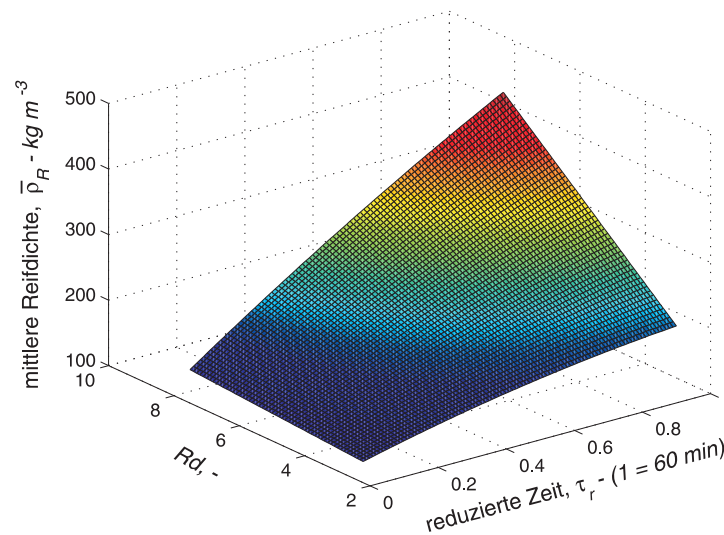


Abbildung 6.5: Mittlere Reifdichte als Funktion der reduzierten Rd-Zahl und der Zeit τ_r

Die Werte der mittleren Reifdichte nehmen mit steigender Rd-Zahl und der Zeit zu.

6.1 Methodische Ansätze zur Erstellung der Korrelationsgleichungen

Die dreidimensionale graphische Darstellung der Korrelationsgleichung lässt sich mit Isolinien darstellen. Die Isolinien bilden die konstanten Werte der mittleren Reifdichte ab, welche für steigende Rd-Zahlen und die Zeit des Experiments zunehmen (Abb. 6.6). Die Korrelationsgleichung sowie ihre graphische Darstellung ist bis zur maximalen Rd-Zahl für die mittlere Reifdichte von 8.4 gültig. Die Anfangsphase der Reifbildung, also die Keimbildung, der Tropfenzuwachs und die -erstarrung sind in der Korrelationsgleichung nicht berücksichtigt.

Einerseits tritt in dieser Anfangsphase der Reifbildung tatsächlich keine Reifstruktur auf und spielt in der Beschreibung der porösen Reifstruktur eine geringe Rolle. Andererseits steigen für kleine Massenströme ausfallenden Wassers in der Anfangsphase die mittleren Abweichungen, welche nicht für das ganze Experiment repräsentativ sind und den Fehler vergrößern. Deshalb berücksichtigt die Korrelationsgleichung für die mittlere Reifdichte nicht die ersten 10 Minuten der Versuchsdauer.

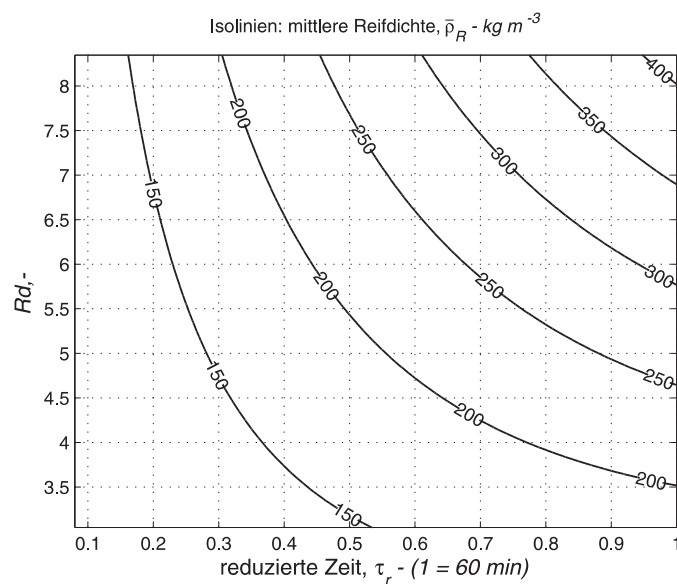


Abbildung 6.6: Mittlere Reifdichte als Funktion der reduzierten Rd-Zahl und der Zeit τ_r .

Die Abweichungen für alle variablen Parameter, welche in der Korrelationsgleichung berücksichtigt werden, sind in Tabelle 6.8 aufgelistet.

6.1 Methodische Ansätze zur Erstellung der Korrelationsgleichungen

Tabelle 6.8: Mittlere Standardabweichungen der Korrelationsgleichung für die mittlere Reifdichte. STD - Standard - Parameter siehe Tabelle 3.1

Parameter	$rF = 30\%$	$rF = 40\%$	$rF = 50\%$	STD	$rF = 70\%$
%	± 5.7	± 2.1	± 3.4	± 4.9	± 1.0
Parameter	$rF = 80\%$	$Re_\infty = 700$	$Re_\infty = 900$	$Re_\infty = 1000$	$Re_\infty = 1100$
%	± 4.1	± 1.6	± 3.3	± 5.0	± 3.6
Parameter	$t_{fL} = 25^\circ C$	$t_{fL} = 28^\circ C$	$t_w = -7^\circ C$	$t_w = -13^\circ C$	$t_w = -16^\circ C$
%	± 3.9	± 6.8	± 4.4	± 7.6	± 5.1
Parameter	$R_a = 1.89\mu m$	$R_a = 5.17\mu m$	$s = 34mm$	$s = 44mm$	$d = 18mm$
%	± 8.4	± 10.3	± 4.6	± 9.5	± 9.0

Darüber hinaus ist, ähnlich wie für die vorhergehende Korrelationsgleichung, die Streuung der Standardabweichung für die Korrelationsgleichung der mittleren Reifdichte graphisch als Funktion der Reifdichte dargestellt.

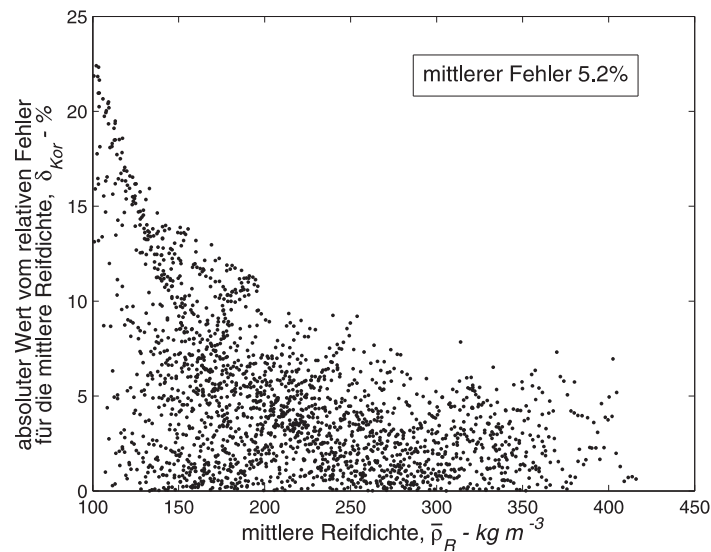


Abbildung 6.7: Standardabweichung der Korrelationsgleichung zur Berechnung der mittleren Reifdichte

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse der experimentellen Versuche der Reifbildung auf gekühlten, im Kanal quer eingebauten Rohren präsentiert. Der Einfluss der Luft-, Substratoberflächenparameter und der Geometrie des Kanals sowie des Rohres auf die wichtigsten Parameter der entstehenden Reifstruktur wurde in einstündigen Versuchen untersucht. Zu den berechneten Parametern, welche die Reifstruktur charakterisieren, gehören: Die Masse M_K und der Massenstrom des Kondensates \dot{M}_K , der Gesamtwärmestrom \dot{Q}_G , das Reifvolumen V_R , die Reifwachstumsgeschwindigkeit \dot{V}_R und die mittlere Reifdichte $\bar{\rho}_R$, welche als die zentrale Größe definiert ist.

- Die Versuche für variierende relative Feuchtigkeit zeigen, dass sich mit steigendem Wassergehalt die Wahrscheinlichkeit des Kondensationsprozesses vergrößert und dementsprechend die Masse des aus der feuchten Luft kondensierten Dampfes steigt. Das Reifvolumen, die Reifwachstumsgeschwindigkeit und die mittlere Reifdichte, als Verhältnis der Masse des ausfallenden Wassers zu dem Reifvolumen, steigen mit zunehmender relativer Feuchte.
- Steigende Luftgeschwindigkeit, ausgedrückt über die Reynoldszahl am Einlauf zum Kanal, vergrößert den Massenstrom der feuchten Luft. Darüber hinaus steigt mit zunehmendem Massenstrom der feuchten Luft auch die Masse des ausfallenden Wassers, was mit der steigenden Luftgeschwindigkeit eine Verstärkung des Verdichtungsprozesses bewirkt. Die Reifschicht für höhere Luftgeschwindigkeiten weist eine geringere Porosität (größere Dichte) und somit eine geringere Isolationswirkung auf.
- Eine Zunahme der Lufttemperatur bewirkt allgemein eine Erhöhung der Masse des Kondensates. Eine größere Differenz zwischen der Luft- und Sub-

stratoberflächentemperatur³⁴ vergrößert den fühlbaren Wärmestrom und verlängert die Tropfenabkühlungsphase. Die mittlere Reifdichte nimmt mit steigender Lufttemperatur zu.

- Die Abnahme der Substratoberflächentemperatur vergrößert die treibende Kraft des Wärmeübertragungsprozesses, d.h. die Geschwindigkeit der Keimbildung und der Tropfenerstarrung nimmt zu. Für niedrigere Substratoberflächentemperaturen ist die Keimbildungsphase kürzer. Mit Abnahme der Substratoberflächentemperatur nimmt die Masse des Kondensates zu und das Reifvolumen steigt. Schließlich steigt mit abnehmender Temperatur auch die mittlere Reifdichte.
- Eine höhere Rauigkeit der Substratoberfläche beeinflusst den Wert der kritischen Energie des Keimbildungsprozesses. Für rauhe Oberflächen nehmen die kritische freie Energie sowie auch der Radius des Keimes ab. Die Reifstruktur wächst schneller an und erreicht eine höhere Porosität, was den Massenstrom des ausfallenden Wassers reduziert. Zugleich nimmt die mittlere Reifdichte ab.
- Der Einfluss der Substratoberflächenstruktur wurde durch die Untersuchung der hydrophoben Lotus[®]- Struktur betrachtet. Aufgrund besserer Wärmeübertragung (Flüssigkeit - Substratoberfläche) erstarren die auf der gekühlten Lotusfolie kondensierenden und wachsenden Tropfen schneller und bilden eine isolierende Schicht. Dies führt zur Entwicklung einer Reifstruktur mit höherer Porosität, welche stärker den Gesamtwärmestrom reduziert und den Kondensationsprozess hemmt.

Ähnliches Phänomen lässt sich für eine rauhe hydrophile Oberfläche feststellen.

- Die Zunahme der Kanalhöhe bei konstanter Reynoldszahl reduziert trotz Erhöhung des Massenstroms die Luftgeschwindigkeit, welche den Verdichtungsprozess stark beeinflusst. Die Wirkung der oberen und unteren Kanalwände auf die Deformation der Geometrie der Reifschicht durch Verringerung der Luftgeschwindigkeit ist deutlich kleiner. Im Endeffekt weist die Reifschicht für größere Kanalhöhen eine kleinere Dichte auf.
- Die Variation des Rohrdurchmessers bei konstanter Reynoldszahl zeigt, dass für ein größeres Querteilungsverhältnis (Verhältnis der Kanalhöhe zum Rohr-

³⁴für konstante Substratoberflächentemperatur

durchmesser) die Masse des Kondensates geringer ist. Die mittlere Reifdichte nimmt mit abnehmendem Querteilungsverhältnis zu.

Die Ergebnisse der experimentellen Versuche sind in Übereinstimmung mit der Theorie der Reifbildung. Unter dem Begriff der Theorie der Reifbildung versteht man den Einfluss; der Wärme- und Stoffübertragungsprozesse in der porösen Reifschicht, des dynamischen Drucks und der Struktur der Substratoberfläche auf die Reifeigenschaften.

In dieser Arbeit wurden für praktische Anwendungen auch Korrelationsgleichungen für die Masse des Kondensates und die mittlere Reifdichte hergeleitet. Diese Gleichungen ermöglichen entweder eine direkte Berechnung der mittleren Reifdichte oder die Berechnung der Masse ausfallenden Wassers und für ein gegebenes Reifvolumen die Ermittlung der Reifdichte. Die Ergebnisse aus den Korrelationsgleichungen stimmen mit den experimentellen Ergebnissen überein. Mit Hilfe der Korrelationsgleichungen und ihrer graphischen Darstellungen wird eine einfache und schnelle Berechnung der gesuchten unbekannten Werte möglich.

Es bleibt noch viel Raum für weitere Versuche bezüglich der Reifbildungsprozesse, insbesondere für die Entwicklung eines mathematischen Modells, welches die Phasenumwandlungsprozesse und den Einfluss der Substratoberflächenstruktur berücksichtigen könnte. Darüber hinaus fehlt in der Fachliteratur eine Beschreibung der Keimbildungsphase, des Kondensationsprozesses und der physikalischen Eigenschaften, die am Anfang der Reifbildung stattfinden. Diese Phänomene spielen sich in der Größenordnung von Mikro- oder Nanometern ab. Neue Messmethoden in Mikro- und Nanoskalen, z. B. die Lasermessmethoden, ermöglichen die Messung der Temperaturverteilung auf der Phasengrenze Reif - feuchte Luft und die Identifikation der Keimbildung.

Weitere Arbeiten an diesen Themen ermöglichen ein besseres Verständnis, eine mathematische Beschreibung des physikalischen Phänomens der Reifbildung und eine bessere Identifikation der Wärme- und Stoffübertragungsprozesse.

Man sollte aber auch nicht vergessen, dass in der Thermodynamik die Beschreibung der phänomenologischen Aspekte nicht zu den einfachen Aufgabenstellungen gehört.

Anhang A

Korrelationsgleichungen für die Wärmeleitfähigkeit des Reifes

Wärmeleitfähigkeit der Reifstruktur

Die Wärmeleitfähigkeit der Reifstruktur ist in der Fachliteratur in den meisten Fällen als Funktion der mittleren Reifdichte definiert. In diesem Anhang werden beispielhaft empirische Korrelationsgleichungen für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeitszahl der porösen Reifschicht vorgestellt.

Die Wärmeleitfähigkeit des Reifes berechnet sich nach Prins [62] zu

$$\lambda_R = 1.7445 \cdot (0.001 \cdot \rho_R + 0.085)^2 - 0.01163, \quad (\text{A.1})$$

Yonko und Sepsy [87] stellen den Zusammenhang in folgender mathematischer Form dar:

$$\lambda_R = 0.024248 + 0.72311 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_R + 0.1183 \cdot 10^{-5} \cdot \rho_R^2. \quad (\text{A.2})$$

Nach Hosoda und Uzuhashi [31] gilt

$$\lambda_R = 0.02895 \cdot (1 + 10^{-4} \cdot \rho_R^2), \quad (\text{A.3})$$

nach Sanders [66]

$$\lambda_R = 0.001202 \cdot \rho_R^{0.963}, \quad (\text{A.4})$$

nach Anderson [77]

$$\lambda_R = -0.00871 + 0.000439 \cdot \rho_R + 1.05 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_R^2, \quad (\text{A.5})$$

und nach Oscarsson et al. [60]

$$\lambda_R = \frac{0.202 \cdot \rho_R \cdot \left(1 - \frac{\rho_R}{1860}\right)}{204 - 0.189 \cdot \rho_R}. \quad (\text{A.6})$$

In der Literatur kann man noch weitere Gleichungen für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Reifschicht finden, in denen Lufttemperatur, Substratoberflächentemperatur, Luftgeschwindigkeit und relative Feuchte als Variablen definiert sind.

Eine interessante Übersicht von verschiedenen Korrelationsgleichungen für die Reifdichte lässt sich bei Shin [74] finden.

Anhang B

Abbildung des Kanals im Rohrbündel

Um die experimentellen Daten für eine industrielle Anwendung nutzen zu können, wurde das im Kanal quer eingebaute einzelne Rohr auf ein Modell eines Rohrbündels abgebildet. Das geometrische Modell des Rohrbündels präsentiert Abbildung 3.1.

Der Kanal mit quer eingebautem Rohr lässt sich als Ausschnitt eines Rohrbündels betrachten. Die Kanalhöhe s entspricht der Distanz zwischen zwei Rohren derselben Reihe. Das Modell des Rohrbündels unterscheidet sich von dem Kanal mit einem einzelnen Rohr durch die Randbedingungen an den Kanalwänden. Durch die Wirkung der Viskosität (Schubspannung) in der laminaren Grenzschicht an den oberen und unteren Kanalwänden wird das Geschwindigkeitsprofil der durchströmenden Luft deformiert.

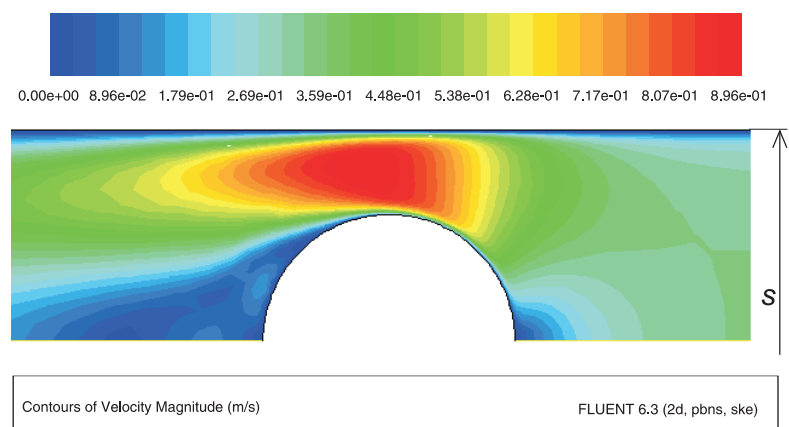


Abbildung B.1: Luftgeschwindigkeitsprofil im Kanal - Standardparameter

Die Deformation des Luftgeschwindigkeitsprofils steigt mit zunehmender Reynoldszahl am Eintritt zum Kanal. Für niedrige Luftgeschwindigkeiten kann der Einfluss der laminaren Grenzschicht auf den Reifbildungsprozess vernachlässigt werden.

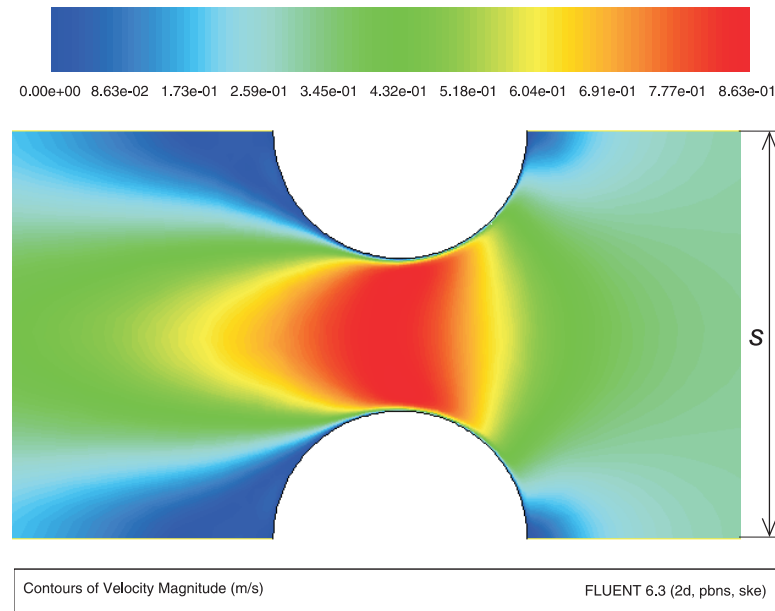


Abbildung B.2: Luftgeschwindigkeitsprofil der ersten Rohrreihe des analysierten Rohrbündelmodells (siehe Abb. 3.1)

Es lässt sich beobachten, dass die maximalen Luftgeschwindigkeiten sowie Luftgeschwindigkeitsprofile im Kanal und zwischen den Rohrreihen vergleichbar sind (siehe Abb. B.1 und Abb. B.2)³⁵. Die Luftgeschwindigkeiten unterscheiden sich in beiden Fällen um etwa 3.7 %. Das Modell des Rohrbündels ermöglicht daher sehr ähnliche geometrische Bedingungen des Kanals. So wird z. B. die gleiche Wirkung des dynamischen Drucks auf die wachsende Reifschicht abgebildet.

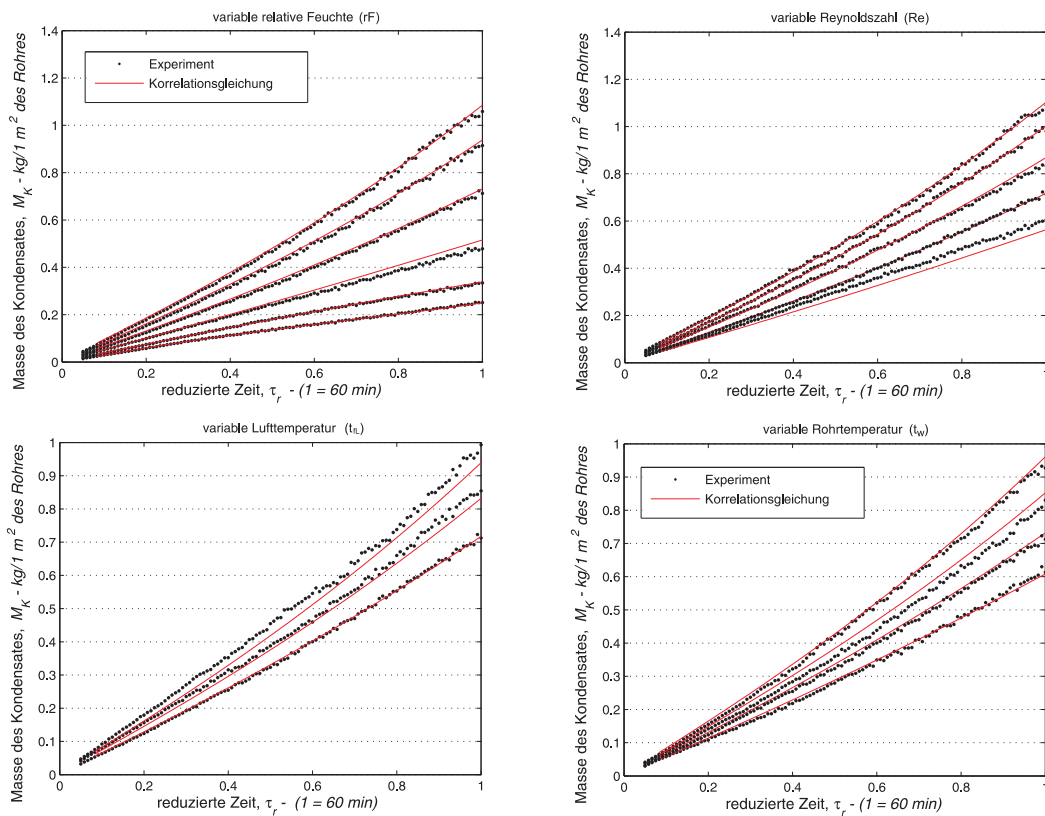
³⁵Die numerische Vergleichsanalyse wurde für die Standardparameter (siehe Tabelle 3.1, S. 43) mit Hilfe des CFD - Programms FLUENT[®] 6.3.26 durchgeführt

Anhang C

Ergebnisse aus Korrelationsgleichungen

In diesem Anhang werden die Verläufe der Korrelationsgleichungen (Kapitel 7) für die Masse des Kondensates und mittlere Reifdichte mit den experimentellen Werten verglichen.

Masse des Kondensates und mittlere Reifdichte



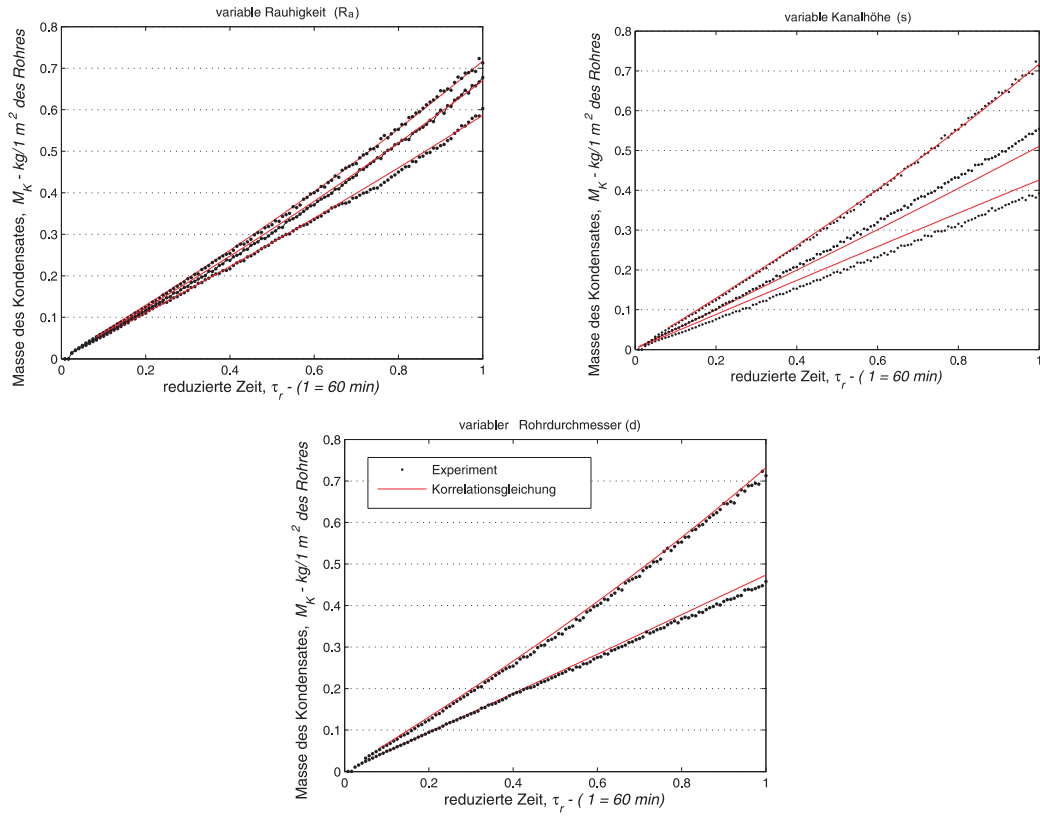
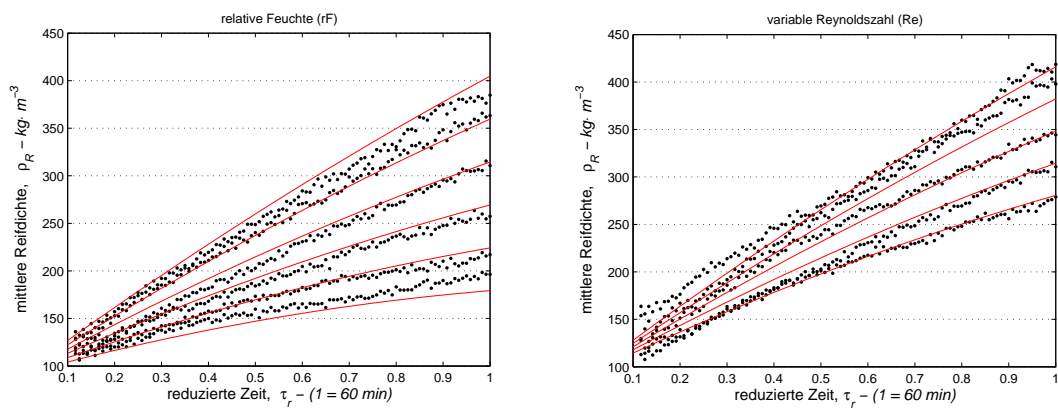


Abbildung C.1: Masse des ausfallenden Wassers aus Experiment und Korrelation



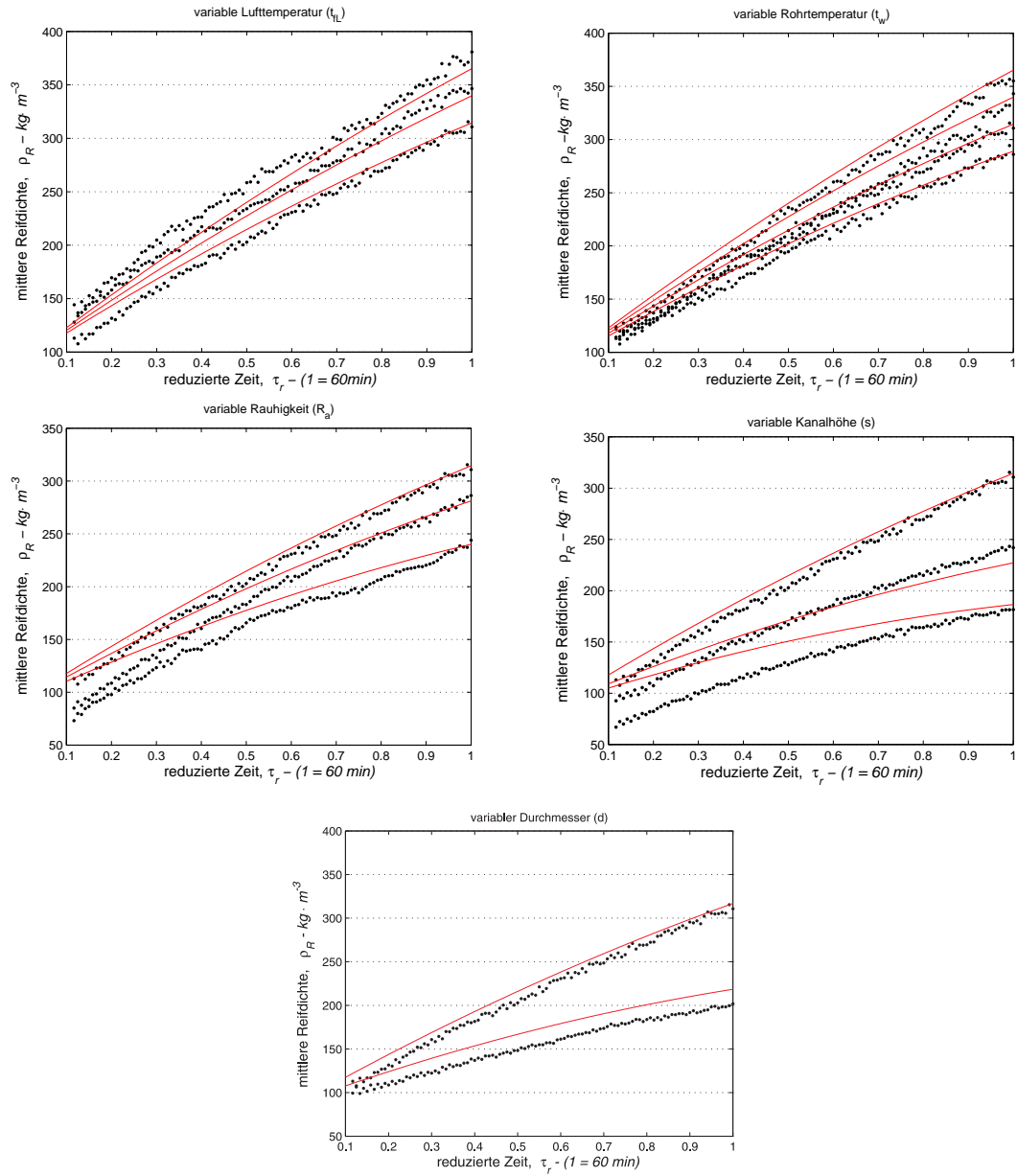


Abbildung C.2: Mittlere Reifdichte aus Experiment und Korrelation

Literaturverzeichnis

- [1] Vaisala HUMICAP Humidity and Temperature Transmitter Series HMT330 USER'S GUIDE. Technical report, 2005.
- [2] J. L. F. Abascal, E. Sanz, R. García Fernández, and C. Vega. A potential model for the study of ices and amorphous water: Tip4p/ice. *J. Chem. Phys.*, 122, 2005.
- [3] A.W. Adamson. *Physical chemistry of surfaces*. John Wiley & Sons, 1990.
- [4] K. Aoki, K. Katayama, and Y. Hayashi. A study of frost formation. *JSME*, 26:87–93, 1983.
- [5] H. Auracher. Effective thermal conductivity of frost. In *Proceedings of the Int. Symp. of Heat and Mass Transfer in Refrigeration, Dubrovnik*, 1987.
- [6] H.D. Baehr and K. Stephan. *Wärme - und Stoffübertragung*. Springer Verlag, 2004.
- [7] K.O. Beatty, E.B. Finch, and E.M. Schoenborn. Heat transfer from humid air to metal under frosting conditions. *refrig. Engineering*, 59:1203–1207, 1951.
- [8] R. Becker and W. Döring. Kinetische Behandlung der Keimbildung in übersättigten Dämpfen. *Annalen der Physik*, 24:719–752, 1935.
- [9] T.Y. Bong, N. E. Wijesundera, and E. L. Saw. Comparition of beta-ray and gamma-ray transmission methods for measurement of frost density distribution. *Exp. Thermal Fluid Science*, 4:567–576, 1991.
- [10] J.C Bronson. Frost formation on a cylinder at cryogenic temperatures. *Adv. Cryogenic Eng.*, 15:457–460, 1970.
- [11] Z. Cerman and W. Barthlott. *Erfindungen der Natur, Bionik - Was wir von Pflanzen und Tieren lernen können*. Rowohlt Taschenbuch Verlag, 2005.

- [12] C.H. Cheng and C.C. Shiu. Frost formation and frost crystal growth on a cold plate in atmospheric air flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45:2489–4303, 2002.
- [13] P.M. Chung and A.B. Algren. Frost formation and heat transfer on a cylinder surface in humid air cross flow. *ASHRAE Trans.*, 66:213–244, 1960.
- [14] W. Coles. Experimental determination of the thermal conductivity of low density ice. Technical report, National Advisory Committee for Aeronautics, 3143, Lewis Flight Propulsion Laboratory, Cleveland, OH, 1954.
- [15] J.R. Cooper and R.B. Dooley. Revised release on the pressure along the melting and sublimation curves of ordinary water substance. *International Association for the Properties of Water and Steam*, 2008.
- [16] C.J. Cremens, O.J. Hahn, and J.H. Skorupski. Frost density measurements on vertical cylinders by gamma-ray attenuation. *Adv. Cryogenic Eng.*, 23:371–375, 1978.
- [17] D. Deng, X. Lie, and S. Xu. Experimental investigation on the performance of air cooler under frosting conditions. *Applied Thermal Engineering*, 23:905–912, 2003.
- [18] M.A. Dietenberger. Generalized correlation of the water frost thermal conductivity. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 26(4):607–619, 1983.
- [19] A. Eucken. Energie- und Stoffaustausch an Grenzflächen. *Die Naturwissenschaften*, 14:209–218, 1937.
- [20] M. Flemming. *Methoden der Simulation und Charakterisierung von nanostrukturen ultrahydrophoben Oberflächen für optische Anwendungen*. PhD thesis, TU - Ilmenau, 2007.
- [21] N.H. Fletcher. Nucleation by crystalline particles. *Journal of Chemical Physics*, 38:237–240, 1963.
- [22] N.H. Fletcher. *The chemical physics of ice*. Cambridge, 1970.
- [23] N.H. Fletcher and C.A. Sholl. Decoration criteria for surface steps. *Acta Metallurgica*, 18:1083–1086, 1970.
- [24] M. Fossa and G. Tanda. Study of free convection frost formation on a vertical plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26:661–668, 2002.

- [25] E. Frasz. *Kristallisation (in polnisch)*. WNT Warszawa, 2003.
- [26] T. Gatchilov and V. Ivanova. Characteristics of the frost formed on the surface of the finned air coolers. In *XV International Congress of Refrigeration*, 1979.
- [27] P. G. Harraghy and J.M. Barber. Frost formation. *Proc. Inst. Refrig.*, 83:13–27, 1987.
- [28] Y. Hayashi, A. Aoki, S. Adachi, and K. Hori. Study of frost properties correlating with frost formation types. *J. Heat Transfer*, 99:239–245, 1977.
- [29] Y. Hayashi, K. Aoki, and H. Yuhura. Study of frost formation and defrosting based on a theoretical model of the frost layer. *Heat Transfer Jap. Res.*, 6:79–94, 1977.
- [30] E. Hofmann. Wärmedurchgangversuche an einem Plattenluftkühler unter besonderer Berücksichtigung der Reifschicht. *Die Kälte, Zeitschrift für Kältforschung*, pages 25–31, 1948.
- [31] T. Hosoda and H. Uzuhashi. Effects of frost on the heat transfer coefficient. *Hitachi Rev.*, 16:254–259, 1967.
- [32] R.W. Hyland and A. Wexler. Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173.15 K to 473.15 K. *ASHRAE Trans.*, Part 2A, Paper 2793, 1983.
- [33] K.A.R. Ismail and C.S. Salinas. Modeling of frost formation over parallel cold plates. *Int. J. of Refrig.*, 22:425–441, 1999.
- [34] M. Jakob. *Heat transfer Vol. I*. New York: Wiley, 1949.
- [35] S. Kamai, S. Mitzushina, S. Kifunte, and T. Koto. Research on the frost formation in a low temperature cooler condenser. *Jap. Science Review*, 2(3):317–326, 1952.
- [36] J. Kamath. *Frost formation between closely spaced parallel plates*. PhD thesis, University of Michigan, USA, 1985.
- [37] L. Kennedy and J. Goodman. Free convection heat and mass transfer under conditions of frost deposition. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 17:477–484, 1974.
- [38] S. Krischer and U. Grigull. Mikroskopische Untersuchung der Tropfenkondensation. *Wärme- und Stoffübertragung*, 4:48–59, 1971.

- [39] D. Lamb and W.D. Scott. The mechanism of ice crystal growth and habit formation. *Journal of the atmospheric sciences*, 31:570–580, 1973.
- [40] K.J. Langeheinecke. *Auswirkungen der Keimbildungsphase auf Reifbildungsvorgänge an gekühlten und überströmten, ebenen Platten*. PhD thesis, TU Darmstadt, 2005.
- [41] H. Lee, J. Shin, S. Ha, B. Choi, and J. Lee. Frost formation on a plate with different surface hydrophilicity. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47:4881–4893, 2004.
- [42] K.S. Lee, S. Jhee, and D.K. Yang. Prediction of the frost formation on a cold flat surface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46:3789–3796, 2003.
- [43] K.S. Lee, W.S. Kim, and T.H. Lee. A one - dimensional model for frost formation on a cold flat surface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 40(18):4359–4365, 1997.
- [44] K.S. Lee, W.S. Kim, T.H. Lee, and S.Y. Lee. An experimental study on the behavior of frost formation in the vertical plate heat exchanger. In *Proceedings of the 1994 International Refrigeration Conference, Purdue University*, 1994.
- [45] K.S. Lee, T.H. Lee, and W.S. Kim. Heat and mass transfer of parallel plate heat exchanger under frosting condition. *Kor. J. Air.Cond. Refrig. Eng.*, 6(2):155–165, 1994.
- [46] Y.B. Lee and S.T. Ro. An experimental study of frost formation on a horizontal cylinder under cross flow. *Int. J. Refrigeration*, 24:468–474, 2001.
- [47] Y.B. Lee and S.T. Ro. Frost formation on a vertical plate in simultaneously developing flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26:939–945, 2002.
- [48] Y.B. Lee and S.T. Ro. Analysis of the frost growth on a flat plate by simple models of saturation and supersaturation. *Exp. Thermal and Fluid Science*, 29:685–696, 2005.
- [49] A. Lüer. *Reifbildung an parallelen, gekühlten Platten eines mit feuchter Luft laminar durchströmten Kanals*. PhD thesis, TU Darmstadt, 1998.
- [50] A. Lüer and H. Beer. Frost deposition in a parallel plate channel under laminar flow conditions. *Int. J. Therm. Sci.*, 39:85–95, 2000.

- [51] H. Lotz. Wärme- und Stoffaustauschvorgänge in bereifenden Lamellenrippenluftkühlern im Zusammenhang mit deren Betriebsverhalten. *Kältetechnik-Klimatisierung*, pages 208–217, 1971.
- [52] Y. Mao and R.W. Besant. Measurement and correlations of frost properties with air flow over a flat plate. *ASHRAE Trans.*, 98 (Part 2):65–78, 1992.
- [53] B.T. Marinyuk. Heat and mass transfer under frosting conditions. *Int. J. Refrigeration*, pages 366–368, 1980.
- [54] P.F. Monaghan, F. W. Grealish, and D. P. Finn. An automatic non-contact technique for investigation of the effect of frosting on wind convector heat transfer performance. *Proc. 2nd UK Nat. Heat Transfer Conference, Glasgow*, 2:1575–1588, 1988.
- [55] B. Na and R.L. Webb. A fundamental understanding of factors affecting frost nucleation. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46:3797–3808, 2003.
- [56] H. Nakamura. Free convection heat transfer from humid air to vertical plate under frosting conditions. *Bull. JSME*, 17(106):75–82, 1974.
- [57] D.L. O’Neal. *The effect of frost formation on the performance of a parallel plate heat exchanger*. PhD thesis, Purdue University, 1982.
- [58] D.L. O’Neal and D.R. Tree. Measurement of frost growth and density in a parallel plate geometry. *ASHRAE*, pages 278–290, 1984.
- [59] D.L. O’Neal and D.R. Tree. A review of frost formation in simple geometries. *ASHRAE Trans.*, 91:261–281, 1985.
- [60] S. P. Oscarsson, K. I. Krakow, and S. Lin. Evaporator models for operation with dry, wet, and frosted finned surfaces- part 1-heat transfer and fluid flow theory. *ASHRAE Trans.*, 96(1):373–380, 1990.
- [61] W. Piening. Der Wärmeübergang an Rohren bei freier Strömung unter Berücksichtigung der Bildung von Schweißwasser und Reif. *Gesundheits-Ingenieur*, 56:493–497, 1933.
- [62] L. Prins. Wärme- und Stoffübertragung in einem querangeströmten, bereifenden Luftkühler. *Kältetechnik*, 8:160–164;182–187, 1956.
- [63] S.P. Raju and S.A. Scherif. Frost formation and heat transfer on circular cylinders in cross-flow. *Int. J. Refrig.*, 16(6):390–402, 1993.

- [64] A.Z. Sahin. Effective thermnal conductivity of frost during the crystal growth period. *Int. J. Heat Mass transfer*, 43:539–553, 2000.
- [65] C. Th. Sanders. Some physical aspects of frost formation on cooled surfaces. In *XIIIth Int. Congress of refrigeration, Washington, USA*, 1971.
- [66] C.T. Sanders. *The influence of frost formation and defrosting on the performance of air coolers*. PhD thesis, Delft Technical University, 1974.
- [67] E. Schmidt, W. Schurig, and I.V. und . Sellschopp. Versuche über die Kondensation von Wasserdampf in Film- und Tropfenform. *Technische Mechanik und Thermodynamik VDI*, 2:53–63, 1930.
- [68] H.W. Schneider. Einfluss der Reifbildung auf den Wärmeübergang eines quer angeströmten Rohres. *VDI Vorsch.Ing.-Wes*, 5:145–176, 1976.
- [69] H.W. Schneider. Equation of the frost growth rate of frost forming on cooled surfaces. *Int. J Heat Mass Transfer*, 21:1019–1024, 1978.
- [70] K. Schropp. *Untersuchungen über die Tau – und Reifbildung an Kühlrohren in ruhender Luft und ihr Einfluss auf die Kälteübertragung*. PhD thesis, TH München, 1934.
- [71] K. Schropp. Untersuchungen über die Tau – und Reifbildung an Kühlrohren in ruhender Luft und ihr Einfluss auf die Kälteübertragung. *Zeitschrift für die gesamte Kältetechnik*, 81-154, 1935.
- [72] W. Shang, K. Aoki, and H. Yuhura. Frost growth in regenerative wheels. *J Heat Transfer*, 127:1015–1026, 2005.
- [73] S.A. Sherif, S.P. Raju, M.M. Padki, and A.B. Chan. A semi-empirical transient method for modelling frost formation on a flat plate. *Int. J. Refrig.*, 16(5):321–329, 1993.
- [74] J. Shin, A. Tikhonov, and K. Ceolhwan. Experimental study on frost structure on surfaces with different hydrophilicity:density and thermal conductivity. *J. Heat Transfer*, 125:84–94, 2003.
- [75] K. Stephan. *Wärmeübergang beim Kondensieren und beim Sieden*. Springer-Verlag, 1998.
- [76] R. Östin. A study of heat exchange under frosting conditions. *Heat Recovery Systems & CHP*, 12:89–103, 1992.

- [77] R. Östin and S. Anderson. Frost growth parameters in a forced air stream. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 34:1009–1017, 1991.
- [78] Y.X. Tao and R.W. Besant. Prediction of spatial and temporal distributions of frost growth on a flat plate under forced convection. *Transactions of the ASME*, 115:278–281, 1993.
- [79] I. Tokura, H. Saito, and K. Kishinami. Study on properties and growth rate of frost layer on cold surfaces. *Journal of heat transfer*, 105:895–901, 1983.
- [80] G.J. Tramell, D.C. Little, and E.M. Killgore. A study of frost formed on a flat plate held at subfreezing temperatures. *ASHRAE Journal*, pages 42–47, 1968.
- [81] V. Tudor, M. Ohadi, M.A. Salehi, and J.V. Lawler. Advances in control of frost on evaporator coils with an applied electric field. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48:4428–4434, 2005.
- [82] A. Umur. *Mechanism of dropwise condensation*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1963.
- [83] F. Urner. Reifbildung auf gekühlten Rohroberflächen. Master’s thesis, TU Darmstadt, 2006.
- [84] H. Wenzel. Erweiterte Theorie der Wärmeübergangs bei Tropfenkondensation. *Wärme- und Stoffübertragung*, 2:6–18, 1969.
- [85] N. Yamakawa, N. Takahashi, and S. Ohtani. Forced convection heat and mass transfer under frost condition. *Jap. Heat Transfer*, 1(2):1–9, 1972.
- [86] D.K. Yang. Frost formation on a cold surface under turbulent flow. *Int. J. Refrig.*, 29:164–169, 2006.
- [87] J.D. Yonko and C.F. Sepsy. An investigation of the thermal conductivity of frost while forming on a flat horizontal plate. *ASHRAE Trans*, 73(1):1.1–1.11, 1967.
- [88] R. Yun, Y. Kim, and M. Min. Modeling of frost growth and frost properties with airflow over a flat plate. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 25:362–371, 2002.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Alexander Schydlo
Geburtsdatum: 03.07.1979
Geburtsort: Hindenburg O/S (Zabrze, Polen)

Schulbildung

09/1987–06/1994 Grundschule in Zabrze, Polen
09/1994–06/1999 Technische Oberschule in Zabrze, Abschluss mit Abitur

Universitätsausbildung

10/1999–01/2004 Grund- und Hauptstudium des Allgemeinen Maschinenbaus und der Energietechnik an der Schlesischen Technischen Universität (STU) in Gliwice, Polen
02/2004–07/2004 Studienaufenthalt und Diplomarbeit an Martin – Luther – Universität (MLU) in Halle
08/2004 Abschluss der Diplom-Hauptprüfung

Berufliche Tätigkeit

09/2004–03/2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wärmetechnik der Schlesischen Technischen Universität (STU) in Gliwice, Polen
04/2005–02/2009 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Technische Thermodynamik der Technischen Universität Darmstadt